

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЖЕЛДАК ТІМУР АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 681.512 : 004.942

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ
КЕРУВАННІ ВИРОБНИЦТВОМ ПРОКАТУ НА ОСНОВІ ДВОРІВНЕВИХ
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Галузь знань – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Т.А. Желдак

Науковий консультант **Слесарєв Володимир Вікторович**,
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2025

АНОТАЦІЯ

Желдак Т.А. Інтегрована система підтримки прийняття рішень при керуванні виробництвом прокату на основі дворівневих техніко-економічних моделей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Україна. Дніпро. 2025.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної *проблеми* обґрунтування принципів та розробки методів і засобів створення інтегрованих систем інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в задачах прогнозування та керування процесами багатоетапного виробництва сортового прокату шляхом розробки комплексу математичних моделей цих процесів, методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень з використанням узагальнених економічних критеріїв.

Більшість металургійних виробництв функціонують на основі технологічного циклу, що складається з кількох операцій, розділених у часі, територіально, а також за виконавцями. Виробництво прокату передбачає велику кількість послідовних операцій, оптимальні рішення, прийняті на рівні окремої операції технологічного процесу не забезпечують досягнення максимальної ефективності виробництва в цілому. Як наслідок, основні фактори, які потребують покращення: показники використання робочого часу, завантаження обладнання та швидкості обігу коштів, вкладених у виробництво. Всі перелічені фактори є економічними, у той час як при оптимізації роботи виробничих систем орієнтуються, зазвичай, на такі показники роботи як час виконання операцій, витрати матеріалів та енергії, кількість виконаних операцій, тощо. На практиці економічні та технологічні критерії не лише пов'язані один з одним, а часто суперечать один одному.

Більшість досліджень, що стосуються автоматизації та моделювання виробничих процесів у виробництві прокату, розглядають у якості об'єкту моделювання окрему операцію, що є частиною загального виробничого процесу.

Актуальним бачиться перехід на вищий рівень абстракції для побудови ряду моделей оптимізації виробництва прокату на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв. Необхідно також синтезувати критерії та обмеження при моделюванні як всього процесу, так і його частин для вирішення оптимізаційних задач.

Метою роботи є підвищення ефективності багатоетапного виробництва прокату шляхом розробки та удосконалення математичних моделей процесів планування та керування, а також розробки обчислювального методу для розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації при плануванні й керуванні цими процесами в складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень.

Об'єкт дослідження – процеси прогнозування, керування та прийняття рішень в багатоетапному виробництві сортового прокату.

Предмет дослідження – математичні моделі процесів прогнозування, керування та прийняття рішень в багатоетапному виробництві сортового прокату, а також обчислювальний метод оптимізації цих процесів у складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень.

Основні наукові положення, що виносяться на захист:

1. План виконання замовлень на виготовлення сортового прокату широкого сортаменту синтезується (в рамках вирішення незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці) на основі згортки критеріїв максимізації частки вчасно виконаних замовлень та мінімізації обсягів незавершеного виробництва, часу неробочого стану обладнання та кількості відхилених замовлень, що дозволяє виконувати тижневі та місячні замовлення за мінімальний час.

2. Запропонований гібридний метод оптимізації на базі штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції, забезпечує знаходження глобального оптимуму багатовимірних задач умовної оптимізації з вищою ймовірністю, ніж у відомих еволюційних алгоритмів, що підвищує ефективність розв'язання цих задач в процесах планування та керування у виробництві прокату.

3. Використання в регресійних моделях механічних характеристик сортового прокату від'ємних ступенів предикторів та штрафу на розмірність поліному забезпечує підвищення точності моделі з одночасним зменшенням кількості її параметрів, що дозволяє замінити безпосередні вимірювання статистичними прогнозами та скоротити час і вартість сертифікації готової продукції.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукові результати, які визначають новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель побудови плану виконання замовлень на виготовлення прокату широкого сортаменту з урахуванням часу переналаштування обладнання, що передбачає одночасне зважене врахування критеріїв, як незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці. Застосування такої моделі дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, ефективніші, ніж отримані за традиційною методикою.

2. Розроблено математичну модель мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення певного замовлення, що спирається на наперед відомий оптимальний розмір передільної заготовки та вимоги до розкроювання готової продукції. Застосування розробленої моделі в багатоетапному металургійному виробництві дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу та загальний обсяг обрізків.

3. Розроблено гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції та обґрунтовані методи адаптації згаданих операторів. Його застосування для задач планування та керування в багатоетапних металургійних виробництвах дозволяє підвищити надійність та точність отриманих розв'язків.

4. Розроблено метод визначення математичних залежностей прогнозуючих моделей металургійних виробництв від хімічних та фізичних параметрів отримання сталі за рахунок використання в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосування штрафу на розмірність апроксимаційного

поліному. Це дозволило підвищити відповідність моделей сутності фізичних процесів, та отримати прогностичні моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації.

5. Набув подальшого розвитку метод прогнозування стійкості футеровки сталеплавильного агрегату за технічними параметрами та статистичними показниками ведення плавки з двоетапною класифікацією поточного процесу на основі навчання. Його застосування дозволило будувати прогнозуючі моделі стійкості футеровки та надавати оператору поради щодо збільшення ресурсу в режимі реального часу.

6. Сформульовано принцип роботи системи підтримки прийняття рішень багатоетапного виробництва сортового прокату при вирішенні задач планування та керування, оснований на паралельній обробці замовлення на різних етапах. Це дозволило підвищити загальну ефективність виробництва за рахунок зменшення витратного коефіцієнту металу, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

7. Отримали подальший розвиток методи навчання рекомендаційних підсистеми оператора конвертерного виробництва, основані на аналізі попередньої діяльності, що використовують шаблони вдалого попереднього досвіду з корекцією на поведінку людини. Застосування цих методів в процесах рафінації та розкислення сталі дозволило суттєво зменшити вплив «людського фактору» на ведення плавки та скоротити використання феросплавів.

8. Удосконалено математичну модель задачі оптимізації конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм з урахуванням матеріально-теплого балансу як багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями. Застосування отриманої моделі дозволяє підтримувати собівартість сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що розроблені у дисертаційному дослідженні принципи, моделі і методи доведені до практичної реалізації у вигляді прототипу інтегрованої системи підтримки

прийняття рішень у виробництві сортового прокату та можуть використовуватись для підтримки прийняття рішень в управлінні технологічними процесами таких виробництв.

Результати теоретичного дослідження, висновки і рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, використано у виробничому процесі ряду підприємств Дніпропетровщини, а також в навчальному процесі на факультеті інформаційних технологій НТУ «Дніпровська політехніка» при викладанні дисциплін «Системи штучного інтелекту», «Самонавчання складних систем», «Інтелектуальний аналіз даних» та «Еволюційні технології прийняття рішень в умовах невизначеності», при підготовці курсових і кваліфікаційних робіт.

Ключові слова: прогнозування, керування, виробництво прокату, СППР, ретроспективне навчання, інтегрована система, критерій, оптимальність, регресійні моделі, параметричні методи, багатокритеріальність, математичні моделі, умовна оптимізація, еволюційний метод, адаптивний алгоритм, штучні імунні системи, техніко-економічні моделі.

ABSTRACT

Zheldak T.A. Integrated decision support system for managing rolled steel production based on two-level technical and economic models. – Qualification: scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.13.07 – Automation of control processes. – National Technical University “Dnipro Polytechnic”. Ukraine. Dnipro. 2025.

The dissertation is devoted to solving the current scientific and technical problem of substantiating the principles and developing methods and means of creating integrated information and analytical decision support systems in the tasks of forecasting and controlling the processes of multi-stage production of rolled steel by developing a complex of mathematical models of these processes, self-learning methods, and optimizing order fulfillment using generalized economic criteria.

Most metallurgical productions operate according to a technological cycle consisting of several operations, separated in time, space, and by performers. Rolled steel production involves a large number of sequential operations; optimal decisions made at the level of a single technological process operation do not ensure the achievement of maximum overall production efficiency. As a result, the main factors that need improvement are indicators of working time use, equipment utilization, and the speed of turnover of funds invested in production. All of the above factors are economic, whereas, when optimizing the operation of production systems, they are usually focused on performance indicators such as execution time, material and energy consumption, number of operations performed, etc. In practice, economic and technological criteria are not only related to each other, but often contradict each other.

Most studies on the automation and modeling of production processes in rolled steel production treat a separate operation within the overall process as the object of modeling. It is considered relevant to move to a higher level of abstraction to build several models for optimizing rolled steel production at the enterprise level using generalized economic criteria. It is also necessary to synthesize criteria and constraints when modeling both the entire process and its parts to solve optimization problems.

The purpose of the work is to increase the efficiency of multi-stage rolled steel production by developing and improving mathematical models for planning and control processes, and by creating a computational method for solving multi-criteria optimization problems when planning and controlling these processes within an integrated decision support system.

The object of the study is the processes of forecasting, control, and decision-making in multi-stage rolled steel production.

The study examines mathematical models for forecasting, control, and decision-making in multi-stage rolled steel production, along with a computational method for optimizing these processes within an integrated decision support system.

The main scientific provisions submitted for defense:

1. The order fulfillment plan for the production of wide-range rolled products is synthesized (within the framework of solving the open-ended traveling salesperson problem in the maximum metric) based on the convolution of criteria for maximizing the share of orders completed on time and minimizing the volume of unfinished production, equipment downtime and the number of rejected orders, which allows fulfilling weekly and monthly orders in the minimum time.

2. The proposed hybrid optimization method based on artificial immune systems, which uses adaptive crossover, mutation, and population compression operators, provides a higher probability of finding the global optimum of multidimensional conditional optimization problems than known evolutionary algorithms, which increases the efficiency of solving these problems in the planning and control processes in rolled products production.

3. The use of negative degrees of predictors and a penalty for the dimension of the polynomial in regression models of mechanical characteristics of long-rolled products provides an increase in the accuracy of the model with a simultaneous reduction in the number of its parameters, which allows replacing direct measurements with statistical forecasts and reducing the time and cost of certification of finished products.

Scientific novelty of the obtained results. The scientific results that determine the novelty of the dissertation work are as follows:

1. A mathematical model for building a plan for fulfilling orders for the manufacture of wide-range rolled products has been developed, taking into account the time of equipment reconfiguration, which involves simultaneous weighted consideration of criteria as an open-ended traveling salesperson problem in the maximum metric. The use of such a model enabled the creation of building plans in real time that are more effective than those produced by the traditional method.

2. A mathematical model for minimizing the amount of metal used to manufacture a particular order has been developed, which is based on the optimal size of the reworked workpiece, and the requirements for cutting the finished product are known in advance. The use of the developed model in multi-stage metallurgical production allows for reducing the metal consumption coefficient and the total volume of scrap.

3. A hybrid adaptive optimization method based on modeling artificial immune systems has been developed, which uses adaptive operators of crossover, mutation, and population compression and substantiated methods for adapting the aforementioned operators. Its application to planning and control problems in multi-stage metallurgical production increases the reliability and accuracy of the solutions obtained.

4. A method has been developed for determining the mathematical dependencies of predictive models of metallurgical production on the chemical and physical parameters of steel production by using negative degrees of predictors in regression models and applying a penalty on the dimension of the approximation polynomial. This allowed for greater correspondence between models and the essence of physical processes and for the emergence of predictive models of optimal complexity through self-organization.

5. The method of predicting the lining stability of a steelmaking unit based on technical parameters and statistical indicators of smelting with a two-stage classification of the current process based on training has been further developed. Its

application has enabled the development of predictive models of lining stability and provided the operator with real-time advice on increasing the resource.

6. The principle of operation of the decision support system for multi-stage production of long-rolled products when solving planning and control problems has been formulated, based on parallel processing of orders at different stages. This has increased the overall production efficiency by reducing metal consumption, unmeasured products, and work in progress.

7. The methods of training the recommender subsystem of the converter production operator have been further developed, based on the analysis of previous activities, using templates of successful prior experience with correction for human behavior. The use of these methods in the refining and deoxidation processes of steel has significantly reduced the influence of the "human factor" on the smelting process and reduced the need for ferroalloys.

8. The mathematical model of the converter smelting optimization problem according to the combined economic criterion, taking into account the material and heat balance as a multi-criteria problem with fuzzy constraints, has been improved. The application of the resulting model allows maintaining steel costs at a minimum during fluctuations in material prices, significant changes in cast iron properties, or when replacing some coolers with others.

The **practical significance** of the results obtained is that the principles, models, and methods developed in the dissertation research have been brought to practical implementation in the form of a prototype of an integrated decision support system in the production of long-rolled products and can be used to support decision-making in the management of technological processes of such productions.

The results of theoretical research, conclusions and recommendations contained in the dissertation work were used in the production process of several enterprises in the Dnipropetrovsk region, as well as in the educational process at the Faculty of Information Technologies of the Dnipro University of Technology when teaching the disciplines "Artificial Intelligence Systems", "Self-learning of Complex Systems",

"Intelligent Data Analysis" and "Evolutionary Decision-Making Technologies under Uncertainty", in the preparation of course and qualification papers.

Keywords: forecasting, control, rolled steel production, DSS, retrospective learning, integrated system, criterion, optimality, regression models, parametric methods, multi-criteria, mathematical models, conditional optimization, evolutionary process, adaptive algorithm, artificial immune systems, technical and economic models.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

1. Желдак Т.А., Зіборов І.К. Структура та функції інтегрованої СППР у процесах керування багатоетапним прокатним виробництвом”, Сучасні інформаційні технології, vol.1, pp. 49–56, 2023.
2. Желдак, Т., Зібров, І. Самонавчання підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі в складі СППР керування металургійним виробництвом. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 2022, 2, 32–40. Doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4>.
3. Желдак Т.А. Система підтримки прийняття рішень про використання металу в багатоетапному прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна, Д.М. Гаранжа, Д.О. Сердюк // System technologies. N6 (137). Dnipro, 2021.– p. 85-98.
4. І.К. Зіборов, Т.А. Желдак Розробка інтелектуальної систем підтримки прийняття рішень з самонавчанням для керування технологічними процесами виробництва сталі / І.К. Зіборов, Т.А. Желдак // System technologies. N3 (140). Dnipro, 2022. – p. 35-46.
5. Желдак Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають стійкість футеровки конвертера та побудова прогнозуючої моделі / Т.А. Желдак, Н.А. Антоненко // System technologies. N 6 (131). - Dnipro, 2020. – p. 73-91. DOI: 10.34185/1562-9945-6-131-2020-08
6. Желдак Т.А. Застосування методів формування знань в складі інтелектуальної СППР оптимізації процесу розкислення сталі в конвертерному виробництві / Т.А. Желдак, В.В. Слесарєв, Д.О. Воловенко // System technologies. N3 (86). - Dnipropetrovsk, 2013. - p. 29 – 39.
7. Слесарєв В.В. Інтегровані системи керування багатоетапним металургійним виробництвом на прикладі прокатки труб / В.В. Слесарєв, Т.А. Желдак // System technologies. – N 4.(74), Dnipropetrovsk, 2011. — p. 77–84.
8. Желдак Т.А. Використання систем самонавчання для ідентифікації

марки сталі в киснево-конвертерному виробництві / Т.А. Желдак, Н.А. Кучеренко // Науковий вісник НГУ – Д.: Національний гірничий університет. – 2011. - №1. – с. 94-98.

9. Гаранжа Д.М. Факторний аналіз впливу технологічних параметрів процесу гарячої прокатки на довжину розкату і побудова прогнозуючої моделі / Гаранжа Д.М., Желдак Т.А., Краєв М.В. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2011. – №1 – С. 44–49.

10. Желдак Т.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером / Т.А. Желдак, Д.А. Воловенко // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. – 2011. - №5 – с. 133–136.

11. Желдак Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають мірність сортового прокату та шляхи мінімізації немірної продукції / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // *Науковий вісник НГУ*, №8. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – с. 73-77.

12. Желдак Т.А. Оптимальне одновимірне розкроювання матеріалу у прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2009. — N 4. — С. 43-46.

13. Нестеров М.Е. Повышение эффективности устаревшего производства с помощью современных самообучающихся систем поддержки принятия решений на примере кислородно-конвертерного цеха ДМЗ им. Петровского / М.Е. Нестеров, Т.А. Желдак // *Збірник наукових праць НГУ – Д.: НГУ*. – 2010. - №34, т. 2. – с. 202-207.

14. Слесарев В.В. Оптимізація розкроювання продукції прокатного виробництва з використанням методу пошуку із заборонами / Слесарев В.В., Желдак Т.А., Гаранжа Д.М., Станіна О.Д. // *Збірник наукових праць НГУ*. – 2010. - № 35, т.2 – с. 41-50.

15. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних моделях складних об'єктів та систем / Т.А. Желдак // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2012. — № 3. — С. 95–106. (CrossRef)

16. Желдак Т.А. Застосування методу моделювання колонії мурах до розв'язання комбінаторних задач планування виконання замовлень металургійними підприємствами / Математичні машини і системи. – 2013. – № 4. – С. 95 – 106. (**CrossRef**)

Статті в міжнародних виданнях

17. Слесарев В.В. Математична модель матеріально-теплового балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / В.В. Слесарев, Т.А. Желдак // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. - №1 – с. 97–102. (**Scopus**)

18. Zheldak T. A. The algorithm of artificial immune system simulation with Saaty selection operator and one-dimensional local search / T. A. Zheldak, V. V. Slesarev, I. G. Gulina // Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk, 2016, 5: 149–156. (**Scopus**)

19. Hnatushenko, V. V. Mathematical Model Of Steel Consumption Minimization Considering The Two-Stage Billets Cutting / V. V. Hnatushenko, T. A. Zheldak, L. S. Koriashkina // Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk, 2021, 2: 118-124. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/118> (**Scopus**)

20. Avramenko S.E. Guided hybrid genetic algorithm for solving global optimization problems / S.E. Avramenko, T.A. Zheldak, L.S. Koriashkina // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021, 2.: 174-188. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-2-18> (**WoS**)

21. Slesaryev, V.V. Using of the Tabu search method in optimization the rolled stock layout / V.V. Slesaryev, T.A. Zheldak, D.M. Garanzha and O.D. Stanina // Scientific Reports on Resource Issues. Vol. 2, 2012: Rock Strength, Rock Fragmentation and Effective Use of Energy Potential of Geotechnical Systems. – TU Bergakademie Freiberg. – p. 87-99. (**CrossRef**)

22. Zheldak, T.A. Knowledge-Based Intellectual DSS of Steel Deoxidation in BOF Production Process. / T.A. Zheldak, V.V. Slesarev, and D.O. Volovenko // American Journal of Mining and Metallurgy 1.1 (2013): 7-10. DOI:10.12691/ajmm-1-

1-2 (CrossRef)

23. Zheldak, T.A., and Redko V.. "Using an Evolutionary Heuristics for Solving the Outdoor Advertising Optimization Problem." *Journal of Computer Sciences and Applications* 2.2 (2014): 23-30. DOI: 10.12691/jcsa-2-2-2 (CrossRef)

Публікації, які підтверджують апробацію результатів дослідження

24. Zheldak T. Efficiency Improvement of the Algorithm Based on an Artificial Immune System Modeling Applied to Continuous and Combinatorial Problems / Zheldak, T., Ziborov, I., Lyman, V., Zhuk, A. // *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, 3106, pp. 82–95. (Scopus)

25. Желдак Т.А. Проблема оптимального одновимірного розкрювання матеріалу у прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // *Автоматика – 2008: Тези доповідей XV міжнародної конференції з автоматичного управління*, 23 – 26 вересня 2008 р. – Одеса: ОНМА. – с. 769 – 771.

26. Воловенко Д.О. Факторний аналіз процесу виготовлення товарної продукції в умовах прокатного цеху №1 ДМЗ ім. Петровського / Д.О. Воловенко, Т.А. Желдак // *Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 26-30 травня 2009 р. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2009. – с. 307.*

27. Шев’яков В.О. Програмна підтримка прийняття рішень при виборі маршруту прокатки безшовних труб в умовах «НТЗ–Інтерпайп» / В.О. Шев’яков, Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // *Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 26-30 травня 2009 р. – К.: НТУУ “КПІ”, 2009. – с. 376.*

28. Желдак Т.А. Система підтримки прийняття рішень планування виробництва та контролю перебігу технологічного процесу [Текст] / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // *17-та Міжнапродна коференція з автоматичного управління “Автоматика-2010”. Тези доповідей. Т. 1. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – с. 212-214.*

29. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних

моделях складних об'єктів та систем / Т.А. Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали 13-ї міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2011, Київ, 23-28 травня 2011 р. – К.: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2011. – с. 244.

30. Желдак Т.А. Системний аналіз процесу гарячої прокатки бесшовних труб з оптимізацією системи обробки заказів / Т.А. Желдак // Тезиси докл. Междун. науч.-техн. конф. «Інформаційні технології та інформаційна безпека в науці, техніці та освіті "ІНФОТЕХ-2011"». Севастополь, 5-10 вересня 2011 г. – Севастополь: СевНТУ. – 2011. – с. 133-134.

31. Воловенко Д.А. Підходи до побудови інтелектуальної системи, що керує кислородним конвертером / Д.А. Воловенко, Т.А. Желдак // Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення: Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Севастополь, 5-9 вересня 2011 р. – Севастополь: СевНТУ. – 2011. – с. 225-227.

32. Желдак Т.А. Про вдосконалення однієї еволюційної стратегії дійсночисельної оптимізації / Т.А. Желдак // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2011): тези доповідей ІХ міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2011 р. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2011. – с. 82-83.

33. Желдак Т.А. Автоматизована система регулювання висоти наливу злитків при сортопрокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2012): матеріали ІІІ Міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 14-16 березня 2012 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2012. – с. 107-109.

34. Гаранжа Д.М. Розв'язання задачі одновимірного розкроювання за допомогою метаевристичних алгоритмів // Д.М. Гаранжа, Т.А. Желдак // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2012): матеріали ІІІ Міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 14-16 березня 2012 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2012. – с. 63-65.

35. Желдак Т.А. Математична модель матеріально-теплового балансу

плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Інформаційні технології в освіті, науці й техніці (ІТОНТ-2012): матеріали міжнар. наук.-практ. конф.: Черкаси, 25-27 квітня 2012 р. – Черкаси: ЧДТУ. – 2012. – т.1. – с. 23-24.

36. Желдак Т.А. Застосування технології OLAP для ідентифікації параметрів складних технічних систем при багатоетапному виробництві / Т.А. Желдак // VI міжнародна школа-семінар - "Теорія прийняття рішень", Ужгород, 1-6 жовтня 2012 р. – Ужгород: "Інвізор", 2012 – 118с.

37. Желдак Т.А. Застосування методу оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій та його модифікацій / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2013): матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 13-16 березня 2013 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2013. – с. 105-107.

38. Желдак Т.А. Планування виконання замовлень металургійними підприємствами на основі розв'язків комбінаторних задач / Т.А. Желдак // Мат. IV Всеукр. наук.–практ. конф. "Інформатика та системні науки" ІСН – 2013. Полтава, 21–23 березня 2013 р. – Полтава: «Видавництво». – 2013. – с. 125 – 128.

39. Желдак Т.А. Метод моделювання штучної імунної системи в задачах оптимізації мультимодальних функцій / Т.А. Желдак // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): Матеріали 2-ї міжнар. наук.-техн. конф. 14-17 травня 2013 р. – Черкаси: Маклаут, 2013. – с. 33-36.

40. Желдак Т.А. Використання модифікованого методу моделювання штучних імунних систем для вирішення комбінаторних оптимізаційних задач / Т.А.Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали 15-ї міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2013, Київ, 27-31 травня 2013 р. – К.: ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ", 2013. – с. 271-272.

41. Желдак Т.А. Адаптація алгоритму моделювання штучної імунної системи з селективним оператором Сааті та обмеженим локальним пошуком / Т.А. Желдак // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2013): тези доповідей XI Міжнар. наук.-практ. конф., 20-22 листопада

2013 р. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2013. – с. 80-81.

42. Желдак Т.А. Використання технології OLAP для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Т.А. Желдак // Праці VII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2014. – с. 105-106.

43. Желдак Т.А. Експертна система статистичного контролю механічних властивостей прокатної продукції / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Праці VII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2014. – с. 107-108.

44. Антоненко Н.А. Використання штучної нейронної мережі для прогнозування стійкості футеровки конвертера [текст] / Н.А. Антоненко Н.А., Т.А. Желдак // Праці VIII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2016. – с. 30-31.

45. Зінченко О.В. Побудова регресійної моделі прогнозування стійкості футеровки конвертера з урахуванням мультиколінеарності [текст] / О.В. Зінченко, Т.А. Желдак // Праці VIII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2016. – с. 124-125.

46. Антоненко Н.А. Використання методу групового врахування аргументів для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Н.А. Антоненко, Т.А. Желдак // Матеріали міжнар. конф. «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)». – Київ, КНУ, 2017. – с. 193-194.

47. Зінченко О.В. Побудова регресійної моделі стійкості футеровки кисневого конвертера / О.В. Зінченко, Т.А. Желдак // Матеріали міжнар. конф. «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)». – Київ, КНУ, 2017. – с. 232-233.

48. Желдак Т.А. Статистичні підходи до прогнозування стійкості футеровки конвертера / Т.А. Желдак., Н.А. Антоненко // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. – Дніпро: НМетАУ, 2020. – с. 149-151.

49. Желдак Т.А. Оптимізація двоетапного виробництва металопрокату

шляхом формування зливків / Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем. СМОС-2020: тези доповідей 6-ї міжн. наук.-техн. конф. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ. 2020. – с. 80-81. doi:10.32434/СМОС-2020

50. Желдак Т.А. Керування параметрами оптимізаційного алгоритму на основі моделювання штучної імунної системи / Т.А. Желдак, І.К. Зіборов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2021: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – с. 136-140. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.045>

51. Зіборов І.К. Адаптивний оператор стиснення популяції як запорука успішності еволюційних пошукових алгоритмів / І.К. Зіборов, Т.А. Желдак // «Наукова весна» 2022: мат. XII Всеукр. наук.-техн. конф., Дніпро, 23–24 травня 2022 року – Дніпро : НТУ «ДП», 2022 – с 161-162.

52. Желдак Т.А. Алгоритм роботи підсистеми розкроювання заготовок СППР керування багатостадійним прокатним виробництвом / Т.А. Желдак, І.К. Зіборов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2023: тези доповідей міжн. наук.-практ. конф. – Дніпро: УДУНТ, 2023. – с. 294 – 297. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.079

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ | 23 |
| ВСТУП | 24 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В БАГАТОЕТАПНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ПРОКАТУ ТА СТАНУ ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЇ | 35 |
| 1.1. Виробництво прокату як об'єкт керування (ОК)..... | 35 |
| 1.2. Аналіз автоматизації технологічних процесів металургійних підприємств..... | 41 |
| 1.3 Аналіз моделей та методів в системах підтримки прийняття рішень в багатоетапному виробництві прокату..... | 48 |
| 1.3.1 Моделі і методи планування виконання замовлень | 52 |
| 1.3.2 Задачі умовної та безумовної оптимізації у виробництві прокату та методи їх розв'язання | 58 |
| 1.3.3 Моделі та методи підтримки прийняття рішень в процесах вилавки та розкислення сталі | 63 |
| 1.3.4 Методи структурної та параметричної ідентифікації невідомих залежностей у задачах прийняття рішень | 68 |
| 1.4. Розв'язання задач умовної оптимізації з використанням методу моделювання штучних імунних систем (ШІС)..... | 75 |
| 1.4.1 Сутність методу моделювання ШІС | 76 |
| 1.4.2 Відомі реалізації методу моделювання ШІС, їх особливості та обмеження..... | 82 |
| 1.5 Висновки до розділу 1 | 85 |
| РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОМБІНАТОРНИХ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОЕТАПНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ | 89 |
| 2.1. Математична модель оптимального планування виконання замовлень при широкому сортаменті | 89 |
| 2.2 Математична модель оптимізації ваги зливку з огляду на перебіг технологічного процесу на наступних переділах | 95 |

| | |
|--|------------|
| 2.3 Математична модель оптимального розкрюювання заготовок прокатного виробництва..... | 106 |
| 2.4 Висновки до розділу 2 | 111 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ В ПРОЦЕСАХ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ | 113 |
| 3.1. Математична модель оптимізації шихти при конвертерному виробництві сталі | 113 |
| 3.2 Ідентифікація математичних моделей розкислення сталі та сертифікації готової продукції..... | 119 |
| 3.3 Прогнозування стійкості футеровки конвертера | 123 |
| 3.4 Висновки до розділу 3 | 138 |
| РОЗДІЛ 4. ГІБРИДНИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ШТУЧНОЇ ІМУННОЇ СИСТЕМИ В СППР ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ | 139 |
| 4.1. Удосконалений алгоритм оптимізації HINO-SF | 139 |
| 4.1.1. Застосування квазі-випадкових генераторів антитіл | 141 |
| 4.1.2. Оператор селекції на основі парних порівнянь рішень | 145 |
| 4.1.3. Кросинговер як засіб обміну інформацією | 148 |
| 4.1.4. Мутація як механізм інтенсифікації і диверсифікації..... | 152 |
| 4.1.5. Адаптивний оператор стиснення популяції..... | 156 |
| 4.1.6. Застосування локального пошуку | 158 |
| 4.2. Особливості застосування запропонованого алгоритму для розв'язання комбінаторних задач в СППР | 159 |
| 4.3 Висновки до розділу | 163 |
| РОЗДІЛ 5 ІНТЕГРОВАНА СППР ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ ЇЇ ПІДСИСТЕМ..... | 165 |
| 5.1 Структура та функції інтегрованої СППР виробництва прокату | 165 |
| 5.2 Робота та налаштування окремих модулів інтегрованої СППР..... | 172 |
| 5.3 Алгоритми та функції підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі..... | 176 |
| 5.4 Алгоритм підсистеми оптимізації процесу розкислення сталі | 186 |

| | |
|---|-----|
| 5.5 Висновки до розділу | 198 |
| 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ СППР В ПРОЦЕСАХ КЕРУВАННЯ БАГАТОЕТАПНИМ ВИРОБНИЦТВОМ ПРОКАТУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ..... | 201 |
| 6.1 Дослідження ефективності СППР в задачах планування виконання замовлень на прокатну продукцію | 201 |
| 6.2 Верифікація моделей на основі зворотних залежностей в підсистемах сертифікації готової продукції..... | 206 |
| 6.3 Дослідження гібридного методу моделювання ШС в задачах оптимізації | 214 |
| 6.4 Експериментальна перевірка моделі оптимального розподілу металу з використанням методу ШС | 220 |
| 6.5 Дослідження підсистеми оптимізації процесу розкислення сталі | 226 |
| 6.6. Експериментальна перевірка моделі та методу прогнозування ресурсу футеровки конвертера..... | 231 |
| 6.7. Висновки до розділу 6 | 238 |
| ВИСНОВКИ..... | 241 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 244 |
| ДОДАТКИ..... | 276 |
| ДОДАТОК А. СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ | 276 |
| ДОДАТОК Б. ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 284 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

AIS – artificial immune system

HINO – hybrid immune network optimization

ВКМ – витратний коефіцієнт металу

МГВА – метод групового врахування алгоритмів

МНК – метод найменших квадратів

ОПР – особа, що приймає рішення

ПГН – парогідравлічний ніж

ПГР – пили гарячого різання

СППР – система підтримки прийняття рішень

ШІС – штучна імунна система

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Більшість металургійних виробництв функціонують на основі технологічного циклу, що складається з кількох операцій, розділених у часі, територіально, а також за виконавцями. Досвід роботи вітчизняних та зарубіжних підприємств показує, що навіть оптимальне налаштування систем керування кожною технологічною операцією чи ланкою не забезпечує оптимальність загального виробничого процесу. Пояснюється це, насамперед, несумісністю оптимальних рішень для окремих систем та відсутністю глобального регулятора, який би керував роботою всього підприємства з точки зору кінцевої мети його існування.

За описаних існуючих умов організації виробництва, зокрема металопрокатного підприємства повного циклу, що передбачає велику кількість послідовних операцій, оптимальні рішення, прийняті на рівні окремої операції технологічного процесу не забезпечують досягнення максимальної ефективності виробництва в цілому. Як наслідок, проявляються основні фактори, які потребують покращення: показники використання робочого часу, завантаження обладнання та швидкості обігу коштів, вкладених у виробництво. Всі перелічені фактори є економічними, у той час як при оптимізації роботи виробничих систем інженери та технологи орієнтуються зазвичай на технічні показники роботи, а саме час виконання операцій, витрати матеріалів та енергії, кількість виконаних операцій, тощо. На практиці економічні та технологічні критерії не лише пов'язані один з одним, а часто суперечать один одному.

Більшість досліджень, що стосуються автоматизації та моделювання виробничих процесів у виробництві прокату, розглядають у якості об'єкту моделювання окрему операцію, що є частиною загального виробничого процесу. Актуальним бачиться перехід на вищий рівень абстракції для побудови ряду моделей оптимізації виробництва прокату на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв. Необхідно також

синтезувати критерії та обмеження при моделюванні як всього процесу, так і його частин для вирішення оптимізаційних задач.

Вивченню задач автоматизації та моделювання процесів виробництва прокату та прийняття рішень при керуванні ними присвячені роботи В.М. Куваєва, О.П. Єгорова, D. Dering, D.A. Sala, В.А. Бігєєва, В.С. Богушевського, Я.Л. Альперовича, С.П. Пантейкова та ін.. Різні види експертних і рекомендаційних систем у металургійному виробництві досліджувалися в роботах Y. Zhao, Г.Г. Грабовського, Д.Н. Тогобицької, А.В. Шибка та ін. Розвитку еволюційних методів оптимізації для двійкових та безперервних задач присвячені праці M. Dorigo, L.N., De Castro, В.Є Снитюка, Л.Ф. Гуляницького, С.О. Субботіна, А.П. Карпенка, В.С. Степашка, Ю.П. Зайченка, В.І. Литвиненка та ін. Водночас питання побудови моделей оптимізації виробництва на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв в науковій літературі майже не представлені.

Таким чином, в даній роботі розв'язується актуальна **науково-прикладна проблема** обґрунтування принципів та розробки методів і засобів створення інтегрованих систем інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в задачах прогнозування та керування процесами багатоетапного виробництва сортового прокату шляхом розробки комплексу математичних моделей цих процесів, методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень з використанням узагальнених економічних критеріїв.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень, проведених в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» за держбюджетними науково-дослідними роботами: «Задачі моделювання, оптимізації та прийняття рішень в складних системах різної природи» (№0121U109788) та «Задачі аналізу, моделювання та оптимізації технологічних процесів у складних системах різної природи» (№0123U100011), у яких автор був керівником, а також «Інтелектуальні комп'ютерні технології обробки даних, прогнозування та управління» (№ 0108U000538), «Розробка методів синтезу

моделей корисних енергетичних, акустичних та вібраційних сигналів для ідентифікації процесів гірничого виробництва» (№ 0113U000402), «Рішення задачі генерації проектів оперативних планів бойових дій при ліквідації пожеж на шахтах на основі онтологічних баз знань» (№ 0113U003913), «Розробка автоматизованої розпушувальної установки для розвантаження зсипних змерзлих вантажів» (№ 0116U006739), у яких автор був співвиконавцем.

Ідея роботи полягає у створенні методології побудови інтегрованих багаторівневих систем підтримки прийняття рішень у багатоетапному виробництві сортового прокату із застосуванням комплексу математичних моделей і методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень за зведеними економічними критеріями ефективності.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності багатоетапного виробництва прокату шляхом розробки та удосконалення математичних моделей процесів планування та керування, а також розробки обчислювального методу для розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації при плануванні й керуванні цими процесами в складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі основні **задачі**:

1. Провести огляд та аналіз стану досліджень з проблеми моделювання технологічних процесів багатоетапного металургійного виробництва, методів оптимізації та самонавчання, що застосовуються в системах прийняття рішень в металургії.

2. Розробити математичні моделі

- задачі побудови оптимального розкладу виконання замовлень на продукцію металургійним підприємством повного циклу при широкому сортаменті, яка б враховувала як технологічні, так і економічні критерії у вигляді багатокритеріальної задачі умовної оптимізації;

- задачі оптимізації шихти при конвертерному виробництві з обґрунтуванням вигляду критерію оптимізації собівартості сталі на етапі її

виплавки, враховуючи додаткові витрати на встановлення теплового та матеріального балансу;

- задачі прогнозування механічних властивостей майбутньої готової продукції на ранніх етапах виготовлення вуглецевої сталі з метою формування таких керуючих впливів, які б могли скоригувати процес, що вже відбувається;

- задачі оптимізації ваги зливку з огляду на перебіг технологічного процесу в майбутніх переділах;

- задачі оптимізації розкроювання заготовок у багатоетапному прокатному виробництві з використанням критерію мінімуму залишків для заздалегідь невідомої довжини заготовки.

3. Запропонувати методи навчання та побудови інтелектуальних підсистем для підтримки прийняття рішень оператором конвертерного виробництва в процесах рафінації, розкислення та розливки сталі, на основі вибору і усереднення кращих прецедентів з історії виконання попередніх замовлень, найближчих за нормалізованою метрикою.

4. Розробити ефективний метод ідентифікації закономірностей процесу вигорання футеровки від технічних та технологічних факторів та синтезувати систему математичних й логічних залежностей, що їх описують.

5. Розробити адаптивний еволюційний метод оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи, що уникає недоліків існуючих реалізацій та використовує адаптивні до задачі оператори мутації, схрещування та стиснення популяції. Застосувати розроблений метод як складову інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування металургійним виробництвом для розв'язання задач умовної оптимізації у різних просторах.

6. Обґрунтувати структуру та загальні принципи роботи і навчання інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування багатоетапним металургійним виробництвом. Визначити структуру вхідної та вихідної інформації, перелік задач, що виконуються інтегрованою системою. Розробити спосіб взаємодії системи підтримки прийняття рішень та операторів виплавки та

розливки сталі, а також розкроювання заготовок на різних переділах з механізмом навчання для формування керуючих рекомендацій.

7. Реалізувати прототип інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для планування та керування виробництвом прокату та виконати її апробацію на реальних даних, що описують виробничі процеси на металургійних підприємствах. Проаналізувати результати чисельних експериментів, визначити адекватність запропонованих моделей та алгоритмів, обмеження на їх використання та можливі шляхи вдосконалення.

Об'єкт дослідження – процеси прогнозування, керування та прийняття рішень в багатоетапному виробництві сортового прокату.

Предмет дослідження – математичні моделі процесів прогнозування, керування та прийняття рішень в багатоетапному виробництві сортового прокату, а також обчислювальний метод оптимізації цих процесів у складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач були використані методи математичного та комп'ютерного моделювання процесів функціонування складних багаторівневих систем, а також: методи скінченновимірної оптимізації та функціонального аналізу – для побудови та обґрунтування математичних моделей технологічних процесів та формування оптимальних рішень, врахування обмежень і аналізу моделей; методи регресійного, кореляційного аналізу та метод групового врахування аргументів – для побудови багатofакторних прогнозуючих моделей та формування оптимальних керуючих впливів; методи моделювання мурашиної колонії, штучних імунних систем, генетичних алгоритмів та обмеженого локального пошуку – для розв'язання оптимізаційних задач в просторі перестановок, безперервному та двійковому просторах.

Основні наукові положення, що виносяться на захист:

1. План виконання замовлень на виготовлення сортового прокату широкого сортаменту синтезується (в рамках вирішення незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці) на основі згортки критеріїв максимізації частки вчасно

виконаних замовлень та мінімізації обсягів незавершеного виробництва, часу неробочого стану обладнання та кількості відхилених замовлень, що дозволяє виконувати тижневі та місячні замовлення за мінімальний час.

2. Запропонований гібридний метод оптимізації на базі штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросингвера, мутації та стиснення популяції, забезпечує знаходження глобального оптимуму багатовимірних задач умовної оптимізації з вищою ймовірністю, ніж у відомих еволюційних алгоритмів, що підвищує ефективність розв'язання цих задач в процесах планування та керування у виробництві прокату.

3. Використання в регресійних моделях механічних характеристик сортового прокату від'ємних ступенів предикторів та штрафу на розмірність поліному забезпечує підвищення точності моделі з одночасним зменшенням кількості її параметрів, що дозволяє замінити безпосередні вимірювання статистичними прогнозами та скоротити час і вартість сертифікації готової продукції.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукові результати, які визначають новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель побудови плану виконання замовлень на виготовлення прокату широкого сортаменту з урахуванням часу переналаштування обладнання, що передбачає одночасне зважене врахування критеріїв, як незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці. Застосування такої моделі дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, ефективніші, ніж отримані за традиційною методикою.

2. Розроблено математичну модель мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення певного замовлення, що спирається на наперед відомий оптимальний розмір передільної заготовки та вимоги до розкроювання готової продукції. Застосування розробленої моделі в багатоетапному металургійному виробництві дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу та загальний обсяг обрізків.

3. Розроблено гібридний адаптивний метод оптимізації на основі

моделювання штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції та обґрунтовані методи адаптації згаданих операторів. Його застосування для задач планування та керування в багатоетапних металургійних виробництвах дозволяє підвищити надійність та точність отриманих розв'язків.

4. Розроблено метод визначення математичних залежностей прогнозуючих моделей металургійних виробництв від хімічних та фізичних параметрів отримання сталі за рахунок використання в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосування штрафу на розмірність апроксимаційного поліному. Це дозволило підвищити відповідність моделей сутності фізичних процесів, та отримати прогностичні моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації.

5. Набув подальшого розвитку метод прогнозування стійкості футеровки сталеплавильного агрегату за технічними параметрами та статистичними показниками ведення плавки з двоетапною класифікацією поточного процесу на основі навчання. Його застосування дозволило будувати прогнозуючі моделі стійкості футеровки та надавати оператору поради щодо збільшення ресурсу в режимі реального часу.

6. Сформульовано принцип роботи системи підтримки прийняття рішень багатоетапного виробництва сортового прокату при вирішенні задач планування та керування, оснований на паралельній обробці замовлення на різних етапах. Це дозволило підвищити загальну ефективність виробництва за рахунок зменшення витратного коефіцієнту металу, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

7. Отримали подальший розвиток методи навчання рекомендаційних підсистеми оператора конвертерного виробництва, основані на аналізі попередньої діяльності, що використовують шаблони вдалого попереднього досвіду з корекцією на поведінку людини. Застосування цих методів в процесах рафінації та розкислення сталі дозволило суттєво зменшити вплив «людського фактору» на ведення плавки та скоротити використання феросплавів.

8. Удосконалено математичну модель задачі оптимізації конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм з урахуванням матеріально-теплого балансу як багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями. Застосування отриманої моделі дозволяє підтримувати собівартість сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

Наукове значення роботи полягає у створенні методології автоматизації процесів керування виробництвом сортового прокату шляхом використання зведених економічних критеріїв ефективності виконання замовлень на виготовлення готової продукції замість технологічних, побудови математичних моделей виконання замовлень, а також застосування методів самонавчання для генерації альтернатив у процесах прийняття рішень при плануванні та керуванні такими виробництвами що дозволило підвищити загальну ефективність виробництва за рахунок зменшення витратного коефіцієнту метала, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що розроблені у дисертаційному дослідженні принципи, моделі і методи доведені до практичної реалізації у вигляді прототипу інтегрованої системи підтримки прийняття рішень у виробництві сортового прокату та можуть використовуватись для підтримки прийняття рішень в управлінні технологічними процесами таких виробництв.

Реалізація результатів роботи. Результати теоретичного дослідження, висновки і рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, використано у виробничому процесі ряду підприємств Придніпровського регіону, що підтверджено відповідними актами, наведеним у додатку Б. Зокрема, методика планування виконання замовлень на основі розробленої математичної моделі впроваджено у виробничу практику ТОВ «Інтерпайп Україна» та Іноземного Підприємства «Сайткор Україна». Гібридний адаптивний метод на основі моделювання штучних імунних систем застосовано у практиці ТОВ «Ялантіс Україна». Методика розподілу металу по зливках на основі запропонованої

математичної моделі впроваджена у діяльність АТ «Нікопольський завод феросплавів». Методика прогнозування стійкості плавильного агрегату на основі розроблених математичних моделей – в роботі ТОВ Інтерпайп Ніко Тьюб». Метод самонавчання рекомендаційної підсистеми оператора ливарного виробництва впроваджено на АТ «Нікопольський завод феросплавів».

Водночас результати дослідження, висновки і рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, використано в навчальному процесі на факультеті інформаційних технологій НТУ «Дніпровська політехніка» при викладанні дисциплін «Системи штучного інтелекту», «Самонавчання складних систем», «Інтелектуальний аналіз даних» та «Еволюційні технології прийняття рішень в умовах невизначеності», а також при підготовці курсових і магістерських дипломних робіт студентами спеціальності «124 Системний аналіз», що підтверджено відповідним актом у додатку Б.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним науково-прикладним дослідженням. Всі основні результати, теоретичні та практичні положення і висновки, які виносяться до захисту, одержані та сформульовані автором самостійно. З робіт, опублікованих у співавторстві, використані ті ідеї та розробки, які були отримані автором особисто. Зокрема, автору належать: принцип паралельного виконання замовлень на різних етапах багатоетапного прокатного виробництва [1, 16]; обґрунтування модульного підходу до побудови системи підтримки прийняття рішень в багатоетапному прокатному виробництві [10, 31]; постановка задачі оптимізації витрат металу на виконання певного замовлення шляхом регулювання висоти наливу злитків замість комбінації довжини розкроювання готового злитка [3, 19, 33, 49, 52]; ідея побудови інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на основі моделювання дій реального оператора конвертера з урахуванням результатів його дій [2, 4, 13, 43] та використання методів самонавчання для формування баз знань таких систем [6, 8, 22]; математична модель матеріально-теплого балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації, модель оптимізації шихтування [17, 26, 35];

ідея використання в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосуванні штрафної функції на розмірність апроксимаційного поліному [21, 45] та методика розв'язання задач відновлення математичних залежностей керуючих функцій розкислення та механічних характеристик готової продукції [43, 47]; аналіз проблеми прийняття рішень в багатоетапному прокатному виробництві [7, 27, 28]; аналіз проблеми мінімізації витрат металу на виконання замовлення [9, 11, 25]; методика застосування еволюційних методів до задач оптимізації використання металу [12, 34]; використання підходу на основі агрегованих даних для прогнозування стійкості футеровки [44]; постановка задачі ідентифікації моделі прогнозування стійкості футеровки та критеріїв її оцінювання [5, 46, 48]; метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем з використанням порівняльного оператора селекції [18]; метод адаптації операторів кросинговера та мутації евристичного алгоритму [51]; методи підвищення ефективності методу оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи [24, 50]; застосування розробленого методу до прикладних комбінаторних задач [14, 23, 37, 40]; дослідження впливу операторів кросинговеру, мутації та селекції на ефективність пошукових алгоритмів при розв'язанні комбінаторних задач [20].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на:

18 міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях:

«Автоматика 2008» (м. Одеса, 2008); «Автоматика 2010» (м. Харків, 2010); «Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT)» (Київ, 2009, 2011 та 2013 рр.); «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS)» (Дніпро, 2011, 2012 та 2013 рр.); «Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ)» (Запоріжжя, 2012 та 2013 рр.); «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» ІТММ - 2020, ІТММ - 2021 та ІТММ - 2023 (м. Дніпро, 2020 - 2023 роки); «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» (Черкаси, 2013); «ІНФОТЕХ-2011» (Севастополь, 2011); «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення» (Севастополь, 2011); «Інформаційні технології в освіті,

науці й техніці (ІТОНТ)» (Черкаси, 2012); «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)» (Київ, 2017);

– II Міжнародному науковому симпозиумі Intelligent Solutions, «IntSol 2021» (Київ-Ужгород, 2021);

– 3 Міжнародних школах-семінарах «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2012, 2014 та 2016 рр.);

– 5 Всеукраїнських науково-практичних конференціях: «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем КМОСС-2020» (м. Дніпро, 2020);

«Інформатика та системні науки (ІСН-2013)» (м. Полтава, 2013 р.); III, V та VI Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: теорія і практика» (м. Харків, 2020, м. Дніпро, 2022, м. Запоріжжя, 2023);

– наукових семінарах кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» МОН України та кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій МОН України.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 52 наукових робіт, у тому числі 12 публікацій у закордонних періодичних виданнях та у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз: 4 – у *Scopus* та *Web of Science*, 8 – *Index Copernicus*; 16 наукових статей у фахових виданнях України, 25 матеріалів конференцій і тез доповідей.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел із 272 найменувань на 32 сторінках та 2 додатків на 8 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 290 сторінок, з них 240 сторінок основного тексту (без анотацій 218 сторінок), 45 рисунків, 41 таблиця.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В БАГАТОЕТАПНОМУ ВИРОБНИЦТВІ ПРОКАТУ ТА СТАНУ ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Виробництво прокату як об'єкт керування (ОК)

Металургійна промисловість – одна з базових галузей економіки України, основними галузями якої є чорна й кольорова металургія. Частка металургії у ВВП країни становить близько 38%, у промисловому виробництві – 27,3%, експорті – 34,2%. Частка металургії в податкових платежах у всі рівні бюджетів становить 38%. Як споживач продукції та послуг суб'єктів природних монополій металургія використовує від загальнопромислового рівня 32% електроенергії, 25% природного газу, 10% нафти і нафтопродуктів, її частка у вантажних залізничних перевезеннях – 20%. [1]

Україна є одним з лідерів серед країн-виробників чорних металів у світі. Зокрема, в 2017 році виплавка чавуну склала 20,035 млн. тон; виплавка сталі - 21,284 млн. тонн; виробництво металопрокату - 18,439 млн. тон [2]. У 1 півріччі 2018 року світова виплавка сталі збільшилася в порівнянні з аналогічним періодом минулого року на 4,6%, до 881,455 млн. тон. Згідно з даними worldsteel, в червні 2018 року Україна піднялася з 14-го на 12-те місце в рейтингу світових виробників сталі, випередивши Тайвань і Мексику [3]. Як видно з наведених, статистичних показників, на виробництво прокату припадає лівова частка металургійної продукції України.

Металургійні підприємства в Україні належать до одного з двох видів: з повним металургійним циклом (на підприємстві виготовляються всі три основні види продукції: чавун, сталь та прокат) і з неповним циклом або «міні-заводи» (виробляє один або два види продукції) [166].

Металургійне підприємство з повним металургійним циклом зазвичай складається з низки основних технологічних цехів, зокрема, доменного,

сталеплавильного, кількох прокатних та допоміжних цехів, до яких відносять ремонтні й енергетичні, цех залізничного транспорту і автотранспортний цех та інші допоміжні служби [267]. Типовий склад такого підприємства ілюструє рисунок 1.1, де також показано речовинні потоки між основними цехами, вхідні та вихідні по відношенню до системи.

Початковим виробничим процесом на заводі з повним металургійним циклом є доменний – виплавка чавуну. В доменному цеху металургійного підприємства розміщують кілька доменних печей. На доменних печах з металургійної сировини (агломерат, збагачена залізна руда) виплавляють переробний, ливарний та спеціальні чавуни. По тому переробний чавун зливається у ківші та у рідкому стані транспортується у сталеплавильні цехи. Побічним продуктом доменного процесу є шлак, який може використовуватись зокрема для виготовлення будівельних матеріалів [167].

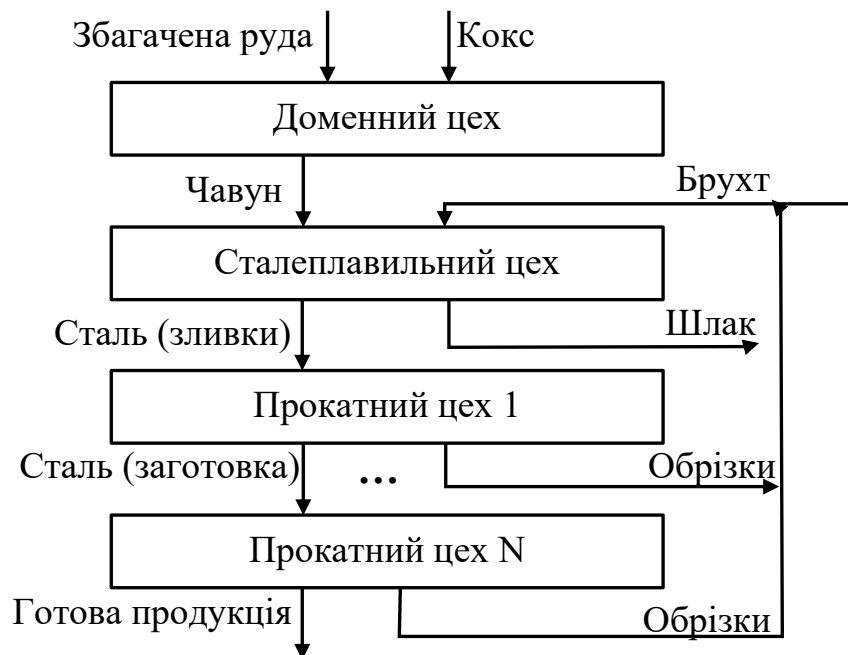


Рис. 1.1. Речовинні потоки в металургійному виробництві повного циклу

У сталеплавильних цехах чавун переробляють на сталь, яку розливають у сталеві зливки, що потім використовуються у прокатних цехах. Отримані сталеві зливки транспортують у обтискний цех, де нагріті зливки на обтискних і заготовочних станах прокатують у заготовки.

Найпоширенішим в Україні способом виплавки сталі є конвертерний [91]. За його використання рідкий чавун і тверду металеву шихту завантажують в конвертер, через верхню фурму продувають киснем. В результаті продувки окислюються і видаляються з розплаву вуглець, кремній, марганець і фосфор. Отриманий розплав піддається подальшій обробці в сталерозливних ківшах. Найпотужнішим представником конвертерного виробництва в Україні є ПрАТ «Арселор-Міттал Кривий Ріг».

Інший поширений спосіб отримання сталі – електродугове виробництво, прикладом якого є завод «Інтерпайп-сталь» в м. Дніпрі [168]. Основною сировиною для виплавки сталі в цьому випадку є брухт чорних металів. В електродуговій печі сталевий брухт плавиться та переробляється у високоякісну сталь за допомогою потужної електричної дуги.

В світі найбільш поширеним є конвертерний тип виробництва сталі (близько 70% на 2018 рік), на другому місці – електродугові печі (близько 29%), решта сталі (близько 1%) виплавляють мартенівським способом [169].

Кінцевим виробничим процесом на металургійному заводі є прокатування сталевих зливків – пластична деформація їх між обертовими валками прокатних станів у прокатних цехах [261]. На багатьох заводах є ще й агломераційна фабрика та коксохімічне виробництво та цехи, де виготовляють вогнетриви, металеві вироби тощо. Прикладом такого виробництва може слугувати комбінат «Азовсталь» (м. Маріуполь).

Подальша декомпозиція технологічних операцій незалежно від способу отримання сталі ілюструє одну з ключових проблем всієї галузі: ресурс- та енергозбереження. У виробництві сортового прокату ця проблема має виключне значення, оскільки значна частина втрат металу приходить на заключні операції технологічного циклу, коли у виготовлений метал вже закладені значні енергоресурси. При цьому, як свідчить аналіз [170], більшість факторів, що визначають якість готової продукції, її мірність та, в результаті, собівартість, мають місце саме на початкових етапах виробництва, а саме при розливці металу, нагріванні зливків, виготовленні і розкроюванні заготовок.

Узагальнено послідовності технологічних операцій при виробництві сортового прокату за [6] та безшовних труб за [5] наведено на рисунку 1.2.

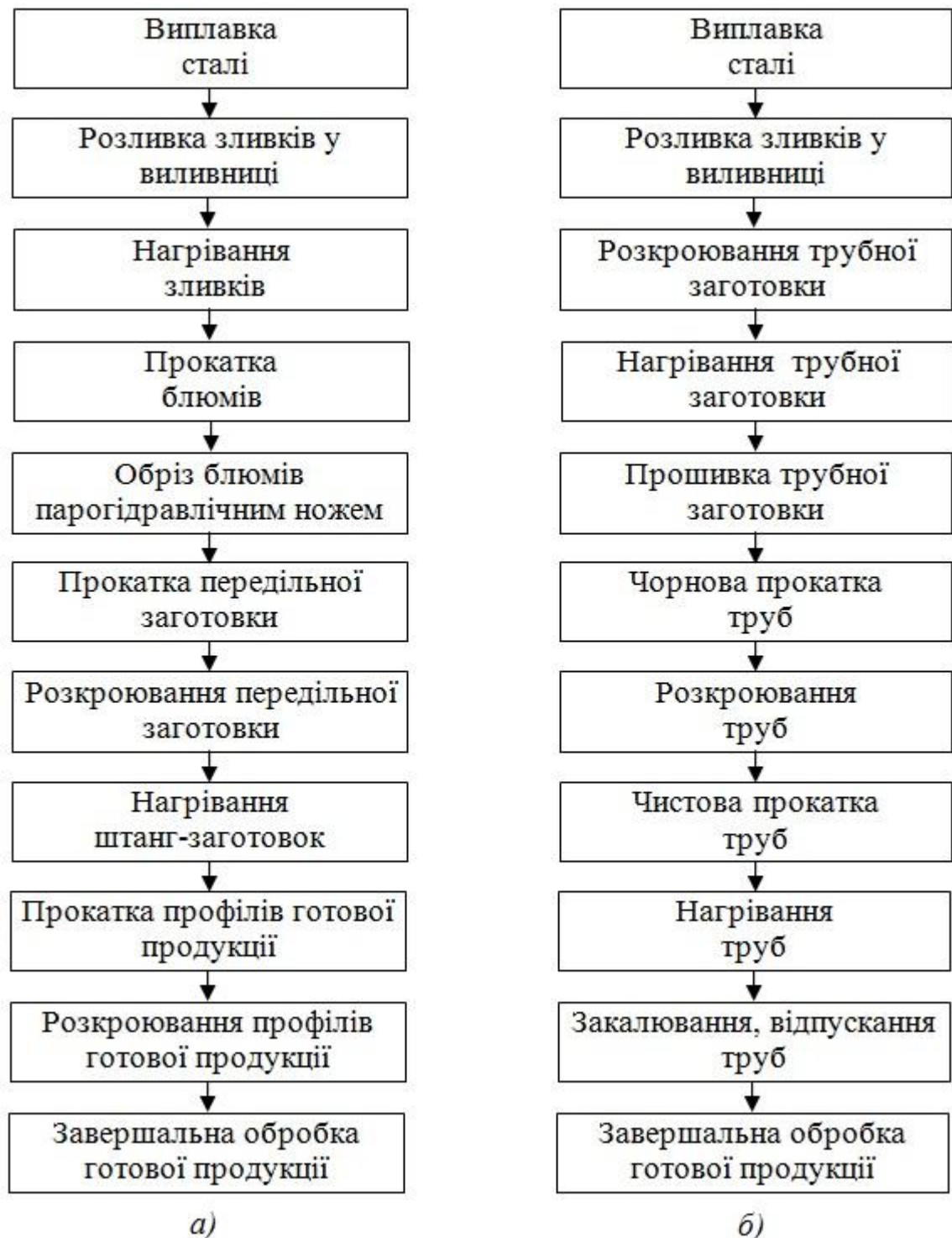


Рис. 1.2 – Етапи технологічного процесу виробництва:
а) сортового прокату; б) безшовних труб

При цьому виконання всіх наведених технологічних операцій забезпечують певні інформаційні системи, які проводять контроль протікання процесу. Здебільшого це системи автоматичного управління (САУ) та автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ПТ). Водночас інформаційно-аналітичні системи управління виробничими процесами, що виконують завдання синхронізації, координації, аналізу та оптимізації випуску продукції в рамках всього виробництва, впроваджені недостатньо.

Останнє породжує проблемну ситуацію, адже згадані вище цілі діяльності, виражені економічними критеріями, напрямку чи опосередковано конфліктують з критеріями якості процесів управління нижніх рівнів. На рівні САУ та АСУ ПТ інженери та технологи орієнтуються зазвичай на технічні показники роботи, а саме час виконання операцій, витрати матеріалів та енергії, кількість виконаних операцій, тощо. Водночас при переході до загальнозаводського рівня прийняття рішень стає явним зв'язок між економічними показниками діяльності підприємства, потоком вхідних замовлень та обсягами і якістю готової продукції.

Будь-яка виробнича система може розглядатися на кількох рівнях абстракції: технічному, технологічному, економічному та організаційному [159]. Система керування виробництвом прокату, що розглядається в даній роботі охоплює економічний та технологічний рівень. Її мета – за рахунок оптимізації певних технологічних процесів досягти покращення загальних економічних показників діяльності підприємства. Необхідність такої системи керування обумовлена відсутністю на ряді підприємств інтегрованих інформаційно-аналітичних систем, яка б охоплювала всі операції технологічного циклу виробництва готової продукції.

Контекстна діаграма процесу виробництва сортового прокату за методологією функціонального моделювання IDEF [160] представлено на рисунку 1.3.

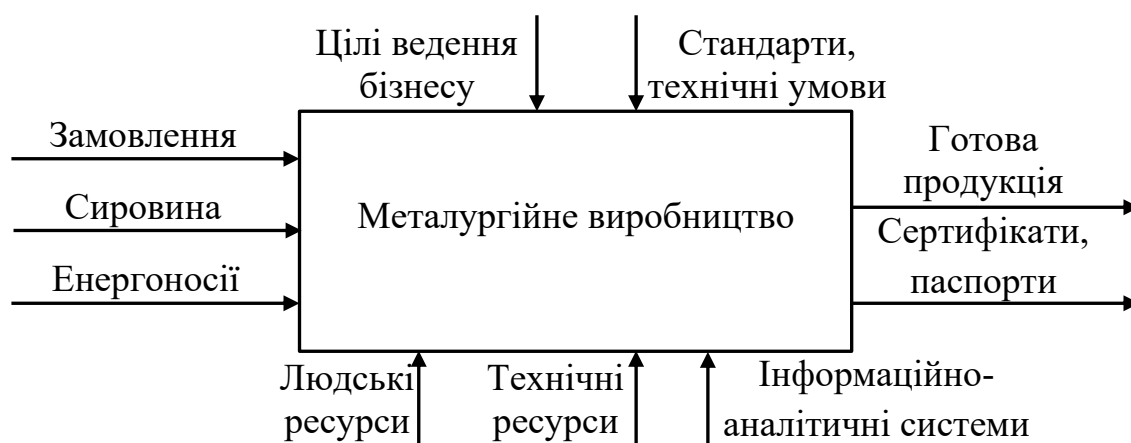


Рис. 1.3. Металургійне підприємство як складна система (нотація IDEF)

Входами для технологічного процесу виступають сировина (руда чи агломерат, кокс, феросплави, сипучі матеріали, тощо), енергоносії (природний газ, електроенергія, вугілля) та потік замовлень на готову продукцію, що є рушійною силою даного процесу. Керуючими впливами для процесу є стандарти та технічні умови, що діють в галузі (на готову продукцію, на окремі технологічні операції та їх параметри), а також цілі ведення бізнесу підприємством. Останні можуть бути виражені через певні критерії ефективності, серед яких мають місце як технологічні так і економічні.

До технологічних показників традиційно відносять [161]:

- обсяг виробництва певного виду продукції в тонах;
- продуктивність ділянки (цеху) в одиницях продукції за одиницю часу;
- завантаженість агрегатів та персоналу у відносних одиницях;
- якість продукції (найчастіше вимірюється у відсотках браку) тощо.

Водночас головні економічні показники ефективності металургійного виробництва за [162, 163], це

- валовий дохід у грн;
- валовий прибуток в грн;
- рентабельність виробництва (у відносних одиницях);
- темпи приросту обсягів виробництва у натуральному чи грошовому вимірі.

Результатом виробничого процесу підприємства що виготовляє сортовий прокат, є готова продукція, яка відповідає з одного боку замовленню, з іншого – існуючим стандартам та вимогам, що ілюструє діаграма 1.3. Останню відповідність закріплено у супутній документації до готової продукції (сертифікаті якості, паспорти відповідності тощо).

Для досягнення цілей діяльності та забезпечення готової продукції відповідно до замовлення та стандартів підприємство з виробництва прокату використовує людські, технічні та інформаційні ресурси. Останні – у вигляді автоматизованих керуючих систем різного рівня – є ресурсом для підвищення ефективності виробництва в цілому, а також поліпшення якості продукції.

Більшість проаналізованих досліджень, що стосуються автоматизації процесів виготовлення сортового прокату [28, 35, 261-267], розглядають у якості об'єкту автоматизації окрему операцію, що є частиною загального виробничого процесу. Актуальним бачиться перехід на вищий рівень абстракції для побудови сімейства систем підтримки прийняття рішень на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв. Необхідно також синтезувати критерії та обмеження в математичних моделях як всього процесу, так і його частин для вирішення оптимізаційних задач.

1.2 Аналіз автоматизації технологічних процесів металургійних підприємств

Технологічні процеси чорної металургії мають достатньо сприятливі умови для комплексної автоматизації. Передумовами для побудови комплексних інформаційно-аналітичних систем керування виробничими процесами є існуючий високий рівень механізації та інформатизації на окремих технологічних ділянках, застосування дистанційного керування механізмами, високий рівень оснащення агрегатів контрольно-вимірювальними приладами [8]. Згідно з [164] існуючі та ті що впроваджуються інформаційно аналітичні

системи металургійних виробництв інтегруються до так званої багаторівневої піраміди управління промисловим підприємством, яку ілюструє діаграма на рисунку 1.4. Автори виділяють п'ять рівнів керування:

- перший, найнижчий – рівень датчиків та виконавчих механізмів, які потребують керування системою вищого рівня або людиною;
- другий – рівень автоматичних систем керування на PLC та PAC (Programmable Logic Controller та Programmable Automation Controller);
- третій – рівень цехових систем підтримки прийняття рішень або систем SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – диспетчерського управління і збору даних;
- четвертий – рівень інформаційно-аналітичних систем підприємства MES (Manufacturing execution system) – систем управління виробничими процесами, що виконує завдання синхронізації, координації, аналізу та оптимізації випуску продукції в рамках всього виробництва.
- п'ятий – рівень корпоративних інформаційних систем (KIC), призначених для автоматизації обліку й керування в межах холдингу чи вертикально-організованої компанії [165].

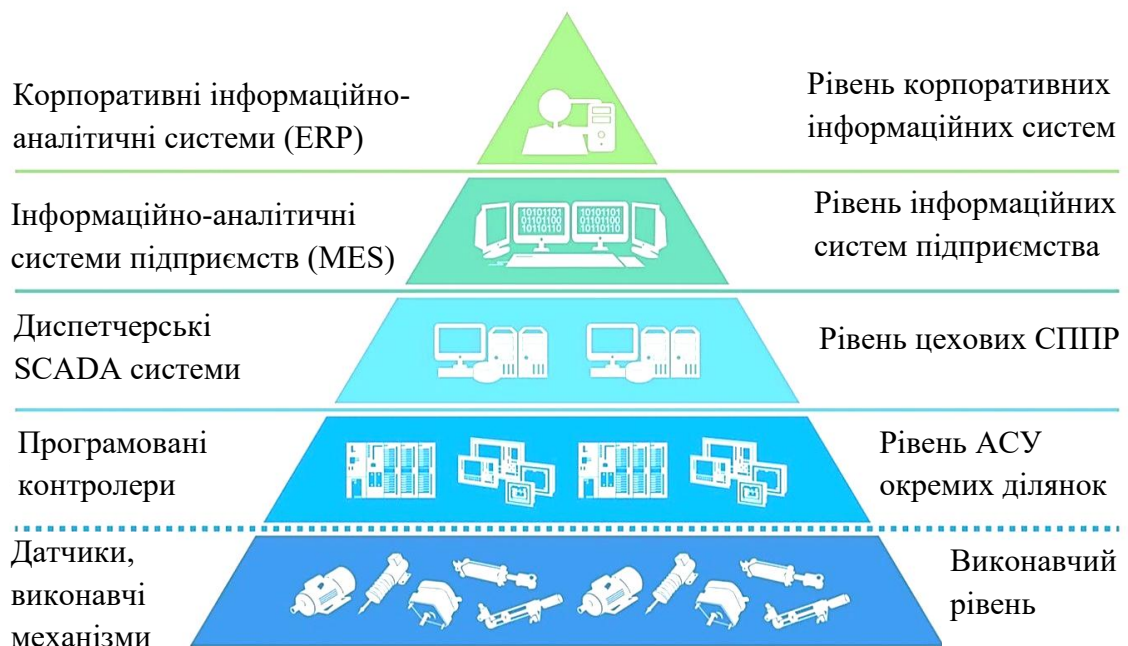


Рис. 1.4. Багаторівнева система управління промисловим підприємством

Аналіз існуючих інформаційно-аналітичних систем на низці підприємств Придніпровського регіону показав, що за умови високого оснащення засобами автоматизації першого та другого рівня, відносно сучасних системах SCADA та обмежено присутніх системах КІС, практично не набули розвитку саме системи четвертого рівня, спрямовані на керування на рівні підприємства. Це може бути пояснено як присутністю заводів з неповним металургійним циклом («Інтерпайп-сталь», «Дніпровський прокатний завод»), так і належністю підприємств до великих холдингів, орієнтованих на КІС-системи (Метінвест, ІСД, УГМК). Відповідно, найменш дослідженими і розвинутими є інформаційно-аналітичні системи рівня підприємства, які є предметом даного дослідження.

Водночас в [164] наголошено, що чорна металургія характеризується відносно невеликою кількістю виробничого персоналу, який безпосередньо обслуговує основні технологічні агрегати. Як наслідок, введення та модернізація існуючих інформаційних систем не приводить, як правило, до скорочення трудових ресурсів, а навпаки, виникає необхідність в додатковому залученні висококваліфікованих працівників для обслуговування систем контролю і управління.

Відтак при проектуванні систем інформаційно-аналітичного супроводу прийняття рішень в прокатному виробництві слід досягати поліпшення організації та оптимізації технологічних процесів. Саме ці чинники мають компенсувати можливі додаткові витрати.

Технологічний процес виробництва прокатної продукції за своєю природою є багатоетапним. Незалежно від вигляду кінцевої продукції (лист, труба, сортовий прокат, колесо чи проволока), метал проходить декілька розділених у часі операцій, виконуваних на окремих ділянках. Прокатування (вальцювання) – заключний етап повного металургійного циклу. [4]. Зокрема, аби стати безшовною трубою, сталь проходить послідовно кілька стадій: зливки,

заготовка, незавершене виробництво, готова труба [5]. Послідовність операцій для фасонних профілів ілюструє рисунок 1.5.

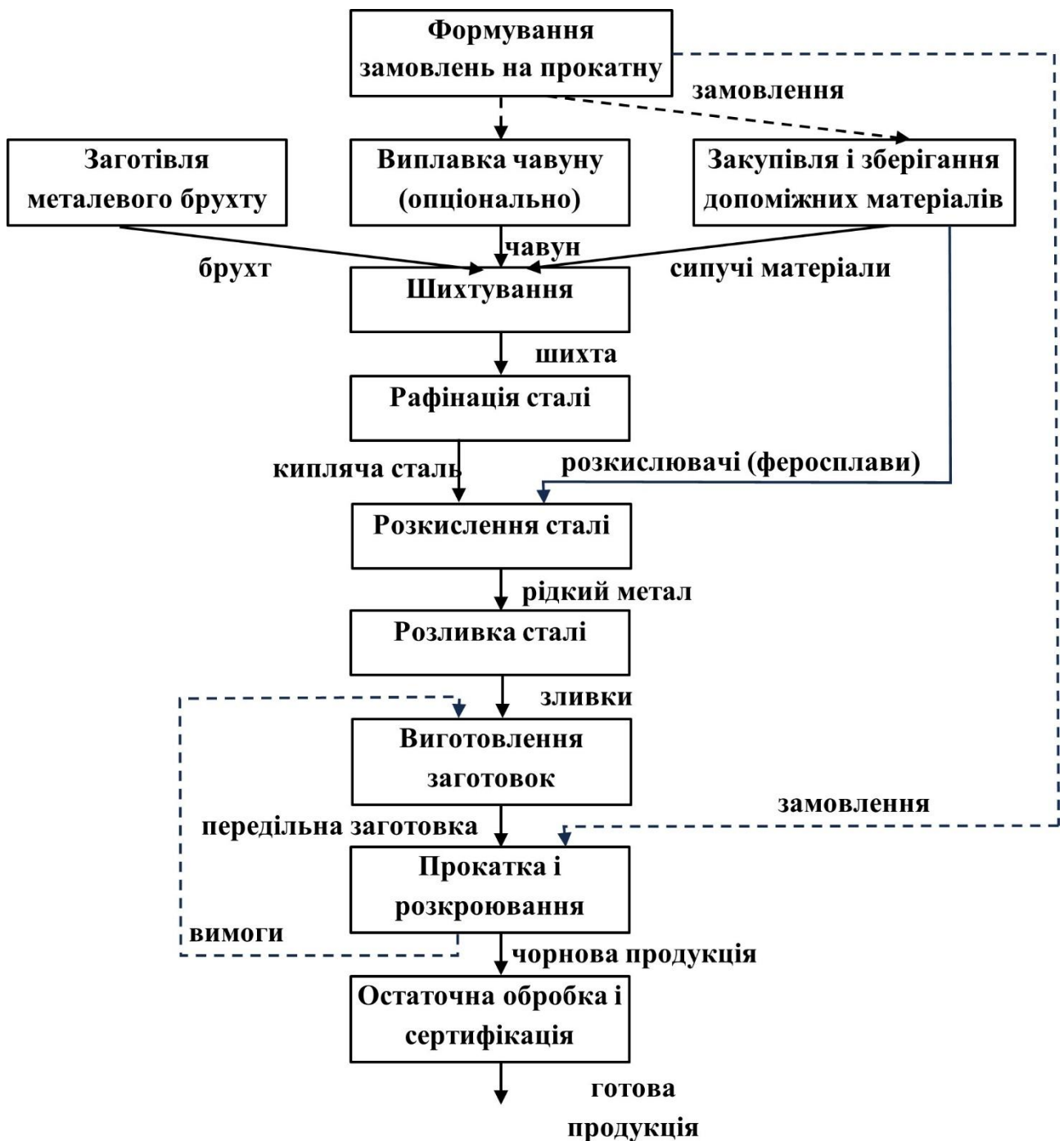


Рис. 1.5 – Операції, речовинні та інформаційні потоки в металургійному виробництві

На рисунку 1.5 представлені блоками окремі технологічні операції, що є етапами виробничого процесу виготовлення прокатної продукції, при цьому

безперервними лініями показані матеріальні потоки, а пунктирними – інформаційні. Слід звернути увагу, що хоча опосередковано всі операції спрямовані на виконання певних поточних замовлень, конкретні вимоги надаються лише до заключних технологічних операцій виготовлення готової продукції, решта регулюються державними стандартами або галузевими технічними умовами на певні види операцій. Водночас заключні технологічні операції накладають певні вимоги на попередні. Одним з найголовніших таких прикладів є вимоги щодо перетину і розкроювання передільних заготовок, адже певний вид готової продукції може бути виготовлений лише з певного типу заготовки. На поточний момент такі вимоги закріплені або у вигляді паперових носіїв, або у вигляді локалізованих баз даних зі стандартами на виготовлення продукції, які не задіяні в інформаційних системах контролю виробництва та інформаційному супроводі виконання замовлень на всіх етапах [265].

Як показав аналіз діяльності ряду підприємств Придніпровського регіону [10, 51, 165], більшість закінчених технологічних операцій є замкненими системами прийняття рішень, у яких завданням є добовий чи змінний план, матеріал (зливки, заготовки, штанги чи незавершені труби) поступають у вигляді зовнішньої змінної, а керуючим впливом є рішення певної особи щодо безпосереднього виконання завдання в умовах, які склалися. Інформаційна взаємодія та одночасна робота цих систем ілюструється схемою на рисунку 1.6.

Як видно з рисунку, кожна технологічна операція рівня i є виконанням власного i -того завдання, яке у значній мірі залежить від результатів діяльності попередніх систем ($i-1$). При цьому результати виконання певної технологічної операції передаються наступникам (операція $i+1$) як матеріальні носії, що супроводжуються електронним або паперовим носієм інформації, що не передбачає інтеграцію цих операцій.

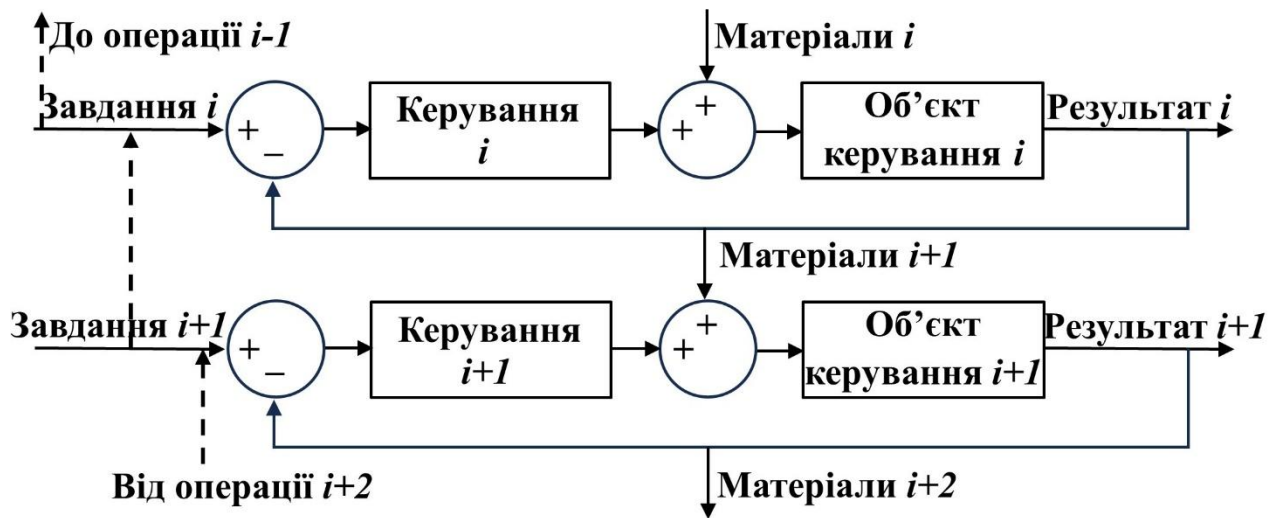


Рис. 1.6 – Виконання окремих технологічних операцій в металургійному виробництві

Також на рис. 1.6 показаний непрямий вплив на прийняття керуючих рішень в поточній технологічній операції i наступних операцій $i+1$, для яких результат i -тої операції є зовнішньою змінною (пунктирні стрілки). Водночас, замовлення готової продукції – завдання для всього підприємства, виконанням якого займається, частіше за все лише останній цех чи ділянка. Зважаючи на це можна зробити висновок [5, 6], що обробка інформації про перебіг процесу проходження металом різних етапів додатково ускладнена наявністю паперових носіїв, в яких фіксуються певні показники технологічного процесу. Ця ситуація унеможливує оперативний контроль за перебігом технологічного процесу та його коригування у відповідності до плану виконання замовлення.

Сучасною світовою тенденцією розвитку металургійних підприємств є застосування систем керування, які на даний момент підрозділяються на чотири умовні рівні [7]:

- інформаційні системи керування на рівні усього бізнесу;
- інформаційні керуючі системи виробництва;
- системи автоматизованого чи автоматичного керування;
- системи безпосередніх вимірювань і датчиків.

Втім, в ході аналізу виробничої діяльності ряду підприємств Придніпровського регіону, що працюють за технологією кількох послідовних переділів, з'ясовано, існуючі керуючі інформаційні системи не виходять за рівень автоматизованого керування і використовують технологічні критерії прийняття рішень (максимальна кількість металу, мінімальний час плавки, мінімальна кількість обрізків тощо).

Також було з'ясовано, що прийняття рішень на всіх виробничих ділянках відбувається в умовах суттєвої невизначеності, подекуди – в умовах браку часу та неповноти інформації. Це обумовлено рядом випадкових факторів, що не можуть бути прогнозовані та мають в основі як природні та технічні збурення, так і «людський фактор».

Як наслідок – при виконанні кожною окремою ділянкою чи навіть цехом плану (змінного, добового, місячного), тим не менше, загальноекономічні показники діяльності підприємства залишаються на достатньо низькому рівні. Особливо це стосується наступних показників:

- об'єм незавершеного виробництва;
- час виконання замовлення;
- витратний коефіцієнт металу (надалі ВКМ).

Маючи фізичну, а точніше, технологічну природу, всі ці показники носять економічний характер. Адже незавершене виробництво – це втілені у металі кошти підприємства, які мали б працювати на прибуток, високий час виконання замовлення часто призводить до відмови від термінових замовлень, навіть, якщо вони економічно вигідні, а збільшений показник витратного коефіцієнту підвищує собівартість продукції.

Як показує практика, в силу наявності декількох критеріїв (економічних та технологічних) у процесі виконання замовлень на товарну продукцію на металургійних підприємствах часто виникають ситуації, у яких неможливо прийняти однозначне рішення, яке було б оптимальним за багатьма критеріями одночасно [8]. Це обумовлено тим, що при виконанні поточного замовлення не враховується весь комплекс замовлень, які виконуються підприємством на

поточний час, а також із нестохастичними випадковими збуреннями в технологічному процесі, які ускладнюють як довготермінове, та і короткочасне планування виробництва [9].

Важливим чинником, який не формалізується при дослідженні автоматизованих систем керування технологічними процесами є «людський фактор», який набуває особливої ваги у металургії, де часто досвід працівника має набагато більше значення, ніж точність та складність будь-якої керуючої апаратури. Зокрема, в деяких випадках розкroювання передільної заготовки на штанги, що відправляються на сортовий стан, вигідніше виконувати за беззалишковою технологією з використанням немірних довжин, а у деяких – відтинати залишок, що знижує показник ВКМ, проте покращує технологічні показники виробництва [10].

Більшість досліджень, що стосуються моделювання металургійних процесів, розглядають у якості об'єкту моделювання окрему операцію, що є частиною загального виробничого процесу. Водночас питання побудови моделей оптимізації виробництва на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв в науковій літературі майже не представлені. Актуальним бачиться перехід на вищий рівень абстракції для побудови моделі оптимізації виробництва на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв. Необхідно також синтезувати критерії та обмеження в математичних моделях як всього процесу, так і його частин для вирішення оптимізаційних задач.

1.3 Аналіз моделей та методів в системах підтримки прийняття рішень в багатоетапному виробництві прокату

Проблемам інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень та інтеграції СППР кількох технологічних операцій або навіть процесів у

металургійному виробництві присвячена значна кількість робіт, як вітчизняних дослідників [14-20], так і закордонних [21-37].

В [14] наголошено необхідність паралельного виконання завдання всіма ланками багатоетапного виробничого процесу і актуальність створення таких систем, які б не тільки оптимальним чином виконували б наявні поточні замовлення, а й прогнозували замовлення майбутніх періодів. Останнє дозволяє увести в алгоритми планування діяльності та контролю якості виробничого процесу процедури прогностичного управління, чим значно покращити показники якості виробничого процесу, а саме термін виконання замовлення та кількість незавершеного виробництва.

На деяких виробництвах в Україні інтегровані системи автоматизованого керування впроваджені уже понад 10 років [15, 17, 18]. У функції інтегрованих систем включено автоматизацію технологічного процесу, інформаційне простежування заготівок і готової продукції, моніторинг, диспетчеризація та аналіз виробництва, а також оперативне планування виробництва.

Авторами [16] запропоновано процесну модель, що дозволяє підвищити ефективність функціонування вертикально-інтегрованої системи металургійної компанії повного циклу та забезпечити стійкість до негативних факторів зовнішнього середовища. При цьому система розглядається на найвищому економічному рівні, без деталізації технологічних процесів, які прийняті детермінованими.

Установлено, що можливості технічного сполучення окремих функціональних підсистем до єдиної моделі керуючого комплексу забезпечуються наступними взаємно-інтегрованими системами: планування виробничих ресурсів підприємства або цеху, керування виробництвом, відкритою системою керування технологічними процесами та регулювання технологічними параметрами [18].

У [19] виконано достатньо докладний аналіз існуючих інформаційних систем, що застосовуються на металургійних підприємствах України, наголошено на необхідності реалізації в складі загальної інформаційної системи

керування металургійним підприємством елементів реєстрації, систематизації та аналізу даних. Водночас, як і в [20], відзначається що всю діяльність щодо прийняття управлінських рішень має виконувати відповідальний фахівець: менеджер, технолог, оператор, тощо. При цьому наголошено на важливості саме інформаційного зв'язку між окремими системами та комплексами.

Для порівняння, за кордоном на більшості великих підприємств інтеграція інформаційних систем, створених 10-20 років тому, виконується на рівні підприємства з використанням стандартних корпоративних інформаційних систем [21, 22], що накладає певні обмеження. Адже будь-який універсальний механізм не дозволяє використовувати знання та аспекти виробничого процесу саме того підприємства, де подібна система застосовується.

Незалежно але майже водночас авторами [23, 24] наголошується на необхідності інформаційної інтеграції окремих технологічних ланок багатоетапного виробництва прокату. Для цього пропонується розробка і впровадження відповідного корпоративного програмного комплексу на основі сховища даних та терміналів для операторів і менеджерів, задіяних у процесах.

Автори [25, 26] аналізують перспективи розвитку металургійного, зокрема прокатного виробництва у Індії та Китаї – країнах, що входять до лідерів у виробництві прокату. Авторі наголошують на необхідності впровадження інтегрованих інформаційних систем та підвищенню ефективності виробництва саме за економічними показниками, серед яких витратний коефіцієнт металу та час виконання замовлень. Також пропонується замінювати традиційний безпосередній підхід до контролю якості та сертифікації готової продукції інтелектуальними технологіями з метою прискорення та здешевлення цих процесів.

Автори [27] пропонують три керовані даними моделі, послідовних процесів рафінації, розкислення та розливки сталі. Згенеровані моделі дозволяють оптимізувати параметри процесу для досягнення оптимальних рівнів продуктивності та якості. Застосовано новий підхід, заснований на ансамблях

для вибору ознак і побудови регресії. Найкращий результат забезпечує випадковий ліс, який робить прогнози більш стабільними і менш зміщеними.

В ряді досліджень [28-30] застосування математичного моделювання для прийняття оптимальних рішень сконцентровано на процесі рафінації сталі. Для моделювання процесів у ванні конвертера автори [28] використовують систему диференціальних та алгебраїчних рівнянь, тоді як в [29] запропонована модель на основі прямозв'язаної нейронної мережі зі зворотним поширенням помилки. Альтернативою є запропонований у [30] підхід на основі застосування для визначення керуючого впливу наївної Байєсівської мережі, навченої на попередніх прикладах з відсівом помилок. Останній може бути в подальшому застосований для моделювання процесів розкислення в рамках пропонованої інформаційної технології.

В [31–35] запропоновано використання в металургійних і зокрема прокатних виробництвах методології експертних систем. Так, автори [31] пропонують експертну систему для підтримки прийняття рішень оператором доменної печі, що виготовляє чавун. Натомість в [32] виконана спроба інтелектуального керування положенням фурми під час продувки конвертера киснем з метою максимізувати ефективність процесу за економічним критерієм. У [33] йдеться про комплексну експертну систему, що охоплює своїми порадами всі дії оператора плавильного цеху від завантаження шихти до розливки готової сталі, впроваджену на одному з підприємств у Нідерландах. Втім, описана система не охоплює попередні операції і орієнтована на хімічні й механічні властивості рідкої сталі, а не готової продукції. Її доповненням можуть служити запропонована в [34] експертна система отримання готової продукції у виготовленні титану, якщо її адаптувати до умов виготовлення сталі. Багатоагентна експертна система, описана в [35], вирішує одну з головних економічних задач технологічного процесу виплавки сталі в конвертері – мінімізації собівартості використаних розкислювачів для виведення газових домішок після рафінації. Побудована на навчанні нечіткої нейронної мережі

ANFIS, дана система має характерний недолік – неможливість ідентифікації та інтерпретації випадків, які не зустрічалися в навчальній вибірці.

Автори [36] пропонують застосування методів машинного навчання у складі експертних систем для прогнозування якості готової сталі. Аналогічний підхід, але для прогнозування механічних властивостей готової продукції прокатного виробництва, пропонується в [37]. В обох випадках інформаційна технологія охоплює лише дві послідовні технологічні операції.

Резюмуючи викладене, слід відзначити, що основним недоліком підходу більшості виконавців є обмеження кола розв'язуваних задач рівнем керування однією (іноді двома) технологічними операціями. Проблеми планування і керування виробництвом, а також автоматизація взаємодії різних рівнів системи (технологічного та економічного) з урахуванням впливу «людського фактору» практично не досліджені і не одержали відповідної промислової реалізації.

Також слід зробити висновок про необхідність побудови ряду математичних моделей складових процесу виготовлення прокатної продукції для розв'язання задач оптимізації цих процесів за запропонованими техніко-економічними критеріями, а також розробки методу розв'язання цих задач.

1.3.1 Моделі і методи планування виконання замовлень

Металургійне підприємство, орієнтоване на виробництво готової продукції, має доволі значний її сортамент. Трубопрокатні та сортопрокатні підприємства в цьому відношенні відрізняються особливим різноманіттям: типорозміри продукції вимірюються сотнями, а іноді й тисячами, а кількість марок сталі – десятками [130-132]. Навіть такі спеціалізовані підприємства, як сталеливарний завод «Інтерпайп–сталь», що був уведений у експлуатацію в 2012 році і спеціалізується на виготовленні циліндричної трубної та колісної заготовки методом безперервної розливки сталі, може випускати продукцію дев'яти діаметрів з понад 30 марок сталі [171]. Статистичні дані обробки замовлень типовим представником галузі свідчать, що кількість клієнтів на

місяць, а тим більше річна, може вимірюватись сотнями, кількість замовлень – тисячами або й десятками тисяч [172].

Слід враховувати, що згідно технологічних інструкцій головна виробнича ланка металургійного підприємства – плавильний агрегат – має працювати за можливістю у безперервному режимі, видаючи сталь порціями через приблизно рівні проміжки часу для наступної обробки. Водночас замовлення на готову продукцію надходять випадковим чином, їх обсяги також носять ймовірнісний характер. Отже, існує небезпека виникнення двох небажаних ситуацій: відмови у обслуговуванні замовлення через неможливість його виконання у зазначений термін та накопичення так званих внутрішніх запасів [173], або незавершеного виробництва. Фактично ці запаси є замороженими у очікуванні майбутніх замовлень коштами підприємства.

Критичні ситуації того чи іншого виду можуть виникати як для окремих видів продукції, так і для кількох одночасно, враховуючи широкий сортамент продукції. Відтак, актуальною для кожного металургійного підприємства є задача побудови оптимального плану обробки замовлень з метою мінімізації незавершеного виробництва, випадків відмови у обслуговуванні та максимізації прибутку підприємства [174].

В деяких джерелах не вводять різницю між часом, після якого замовлення стає неактуальним (втраченим) Tx та часом що планово відводиться на виконання замовлення T , вважаючи T так званим директивним часом [175], після якого замовлення втрачає актуальність. Спостереження за роботою металургійних підприємств, зокрема, Дніпропетровщини, в умовах обмежених логістичних можливостей показали, що величина запасу часу $\Delta t = Tx - T$ становить кілька діб і дозволяє в разі введення певних величин штрафу Dx відтермінувати виконання замовлень з меншим прибутком замість відмови від їх виконання.

Серед недоліків відомих моделей планування виконання замовлень металургійним підприємством, викладених у першому розділі, слід виділити неврахування втрат робочого часу на переналаштування обладнання з випуску

одного виду продукції на інший [52]. Особливо вплив втрат часу на перехід з одного виду продукції на інший помітний у трубопрокатному виробництві, коли технологічний процес складається з послідовних операцій, що ілюструється таблицею 1.1.

Таблиця 1.1 – Технологічні операції виробництва безшовних труб та їх варіативні параметри

| № з/п | Назва технологічної операції | Параметри, що змінюються залежно від замовлення |
|--------------|---------------------------------------|--|
| 1 | Виробництво сталі в печі (конвертері) | |
| 2 | Розкислення та легування | Марка сталі |
| 3 | Розливка заготовок | Діаметр заготовки |
| 4 | Розкроювання передільних заготовок | Довжина заготовки, мірність готової продукції |
| 5 | Нагрівання заготовок | |
| 6 | Прошивка заготовки | Діаметр труби |
| 7 | Прокатка заготовки | Товщина стінки труби |
| 8 | Розкроювання труб | Довжина і мірність готової продукції |
| 9 | Загартування й відпускання труб | Механічні властивості |
| 10 | Фінальна обробка труб | Наявність різьби, муфт, покриття стінок, пакування, маркування |

Подібні таблиці, що мають назву маршрутів прокатки, містять вимоги до параметрів готового виробу. Вони пов'язують вид продукції з технологічними операціями по її виготовленню та конкретним замовленням. Маршрути прокатки, до яких включають повний перелік налаштувань обладнання, будують при плануванні виробництва [175].

Зрозуміло, що попередні операції є визначальними для тих, що йдуть за ними. Але є і зворотній вплив: необхідно враховувати вимоги і особливостей більш пізніх операцій при плануванні ранніх. Зокрема, дослідження технологічних процесів на об'єктах, що розглядалися, показали, що перехід з одного діаметру заготовки на інший (операція 3 табл. 1.1) потребує значно

більше часу (до 480 хвилин), ніж перехід до інших механічних властивостей чи покриття (в межах кількох хвилин).

Відтак актуальною задачею дослідження в межах загальної проблеми інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень вбачається розробка математичної моделі виконання замовлень багатоетапним виробництвом сортового прокату, яка б враховувала можливі втрати на переналаштування обладнання при широкому сортаменті готової продукції і дозволяла б оптимізувати процес обробки всієї множини поточних замовлень за зведеним економічним критерієм.

Широкий сортамент готової продукції виробництва прокату обумовлює необхідність складання місячних, тижневих, добових планів випуску продукції, а інколи – при дрібносерійному виробництві – навіть позмінних. Статистичні дані свідчать, що кількість клієнтів на місяць або на рік може вимірюватись сотнями, кількість замовлень – тисячами або й десятками тисяч [38].

Докладну класифікацію задач теорії розкладів наведено у [39]. Автори розглядають наступну класифікацію задач:

- 1) за кількістю обслуговуючих пристроїв: одноканальні, з кількома ідентичними каналами, з кількома різними каналами та з обмеженими каналами;
- 2) за критерієм оптимальності: мінімальний час виконання всіх завдань, мінімальне зважене запізнення, мінімальна вартість виконання завдань, мінімальна кількість навантажених каналів тощо;
- 3) за характером надходження замовлень: детермінований, стохастичний, нестохастичний).

З огляду на наявність у будь-якому металургійному виробництві згаданого вище плавильного агрегату, зазвичай єдиного на все підприємство, найбільшу увагу привертають моделі одноканальних розкладів з мінімізацією сумарного або зваженого запізнення виконання всіх завдань, що позначається відповідно $1 | \sum T_i$ та $1 | \sum w_i T_i$.

Найповніше задачі згаданих класів розглянуті в [40], де перелічені відомі методи точного знаходження оптимального розв'язку, з'ясовані їх обмеження та

недоліки, а також запропонований ПДС–алгоритм (точний алгоритм з поліноміальною та декомпозиційною експоненційною складовими), який дозволяє вирішувати в реальному масштабі часу задачі розмірністю до 10^3 .

Методи математичного програмування передбачають формулювання оптимізаційної задачі розкладів як комбінаторної задачі з урахуванням ряду обмежень, які зазвичай визначаються як набір нерівностей та/або рівнянь розв'язання подібних задач великої розмірності призводить до експоненційного зростання часу отримання оптимального рішення або необхідних для цього ресурсів [41]. Застосування програмування в обмеженнях [42] дозволяє отримати оптимальне рішення задачі, сформульованої лише як набір обмежень доволі швидко. Втім, потребує використання інструментальних засобів для розв'язування задач із обмеженнями, які є окремими бібліотеками для існуючих імперативних мов [43]. Високу якість рішень задач на перестановках забезпечує метод Ліна-Кернігана [44], який передбачає отримання випадково рішення (послідовності) з наступними обмінами 2 або 3 несуміжних ребер (переходів).

Ефективним підходом до планування розкладів є підхід з моделюванням агентів, що використовують послідовність операцій як обхід неорієнтованого графа [45]. Для розв'язання цілочисельних задач та задач на перестановках цей підхід може досягти хорошого балансу між ефективністю рішення та швидкістю його отримання [46].

Одним з найефективніших методів оптимізації для розв'язання задач на перестановках є так званий метод оптимізації колонією мурах (англ. ant colony optimization, ACO) [47]. Цей підхід полягає в аналізі та використанні моделі поведінки мурах, що шукають дороги від колонії до їжі. У основі методу лежить поведінка мурашиної колонії – маркування вдалих переходів великою кількістю феромону. Робота починається з розміщення мурах у вершинах графу (номери замовлень), потім починається рух мурашок – побудова нової послідовності ймовірнісним методом [48]. Найбільш вдалою реалізацією даного підходу для знаходження наближених розв'язків задачі планування послідовності виконання

замовлень, а також аналогічних задач на перестановках є мінімакський метод мурашиної колонії (MMAS) [49].

Останні досягнення в області планування виробництва передбачають спільне використання мультиагентного методу локального пошуку разом з глобальною пошуковою стратегією, основою на використанні експертних знань у вигляді продукційних правил [50].

Водночас, опис, запропонований у [40-43, 51] не в повні відображає сутність процесів в технологічному процесі багатоетапного виробництва прокату з широким асортиментом продукції. Велику роль відіграють втрати робочого часу на переналаштування обладнання з випуску одного виду продукції на інший [52]. Відтак планування виконання замовлень має виконуватись виключно з урахуванням цього виду втрат. Застосуванню до процесів планування виконання замовлень металургійним підприємством інформаційної технології експертних систем присвячена робота [53], де наголошується викладена необхідність.

В [54] показано, що для задач планування великої розмірності рішення, які забезпечує впровадження інформаційних технологій на основі мультиагентного пошуку рішень та експертних систем виявляється не гіршим за економічним критерієм у порівнянні з розкладами, які створюють найдосвідченіші експерти-люди (нехтуючи їхніми помилками). При цьому такі рішення можуть бути отримані за значно менший час і убезпечені від випадкової помилки, властивої людям-експертам.

Відтак актуальним вбачається застосування для створення планів виконання замовлень у металургійному виробництві інформаційної технології, заснованої на математичній моделі процесу на основі економічного критерію з урахування часу переналаштування обладнання та мультиагентному методі оптимізації цього процесу.

1.3.2 Задачі умовної та безумовної оптимізації у виробництві прокату та методи їх розв'язання

Однією з важливих задач, які розглядаються в межах проблеми підтримки прийняття рішень у виробництві сортового прокату, є задача поділу зливка на передільні заготовки, а тих у свою чергу – на штанги готової продукції. Згадана задача відноситься до двоетапних задач одновимірного розкроювання [55], що в свою чергу є окремим випадком комбінаторної задачі умовної оптимізації [56]. В роботі [57] наголошується на динамічному характері задачі розкроювання для прокатного виробництва, коли кожен поточний злинок ти передільна заготовка можуть розкроюватись для виконання не одного, а кількох паралельних замовлень.

В ході попередніх досліджень [181] з'ясовано, що довжина передільної заготовки, яка поступає на ділянку розкроювання при сортопрокатному виробництві в сьомій операції на рис. 1.2, а), має випадковий характер і залежить від виконання попередніх операцій, у тому числі й від помилок, допущених у ході цих операцій та при контролі їх числових показників. Як видно, з рис. 1.2 б), розкроювання заготовок у трубному виробництві виконується заздалегідь – до прошивки й прокатки труби (операція 3). Втім, одразу після прошивки з'являються технологічні обрізки. Її кількість, а також кратність отриманої в ході прокатки труби – одне з головних факторів невизначеності при оптимізації технологічного процесу, вибору інструменту й побудові так званих маршрутів прокатки [175]. Головною задачею, яка вирішується в трубному виробництві є не просто мінімізація втрат металу, а ще й забезпечення готової продукції саме заданої мірної довжини, адже при формуванні замовлень мірність продукції найчастіше має ключовий вплив на ціну. Аби забезпечити мірність готової продукції іноді пропонують виконувати розрахунок усіх етапів виготовлення труби аж до розкроювання заготовки, виходячи не із заданої довжини, а з верхнього допуску [182].

Розкроювання сортового, пруткового прокату, смуг та труб – одна з поширених і добре досліджених задач, що відносить до класу цілочисельного

програмування [56-66]. В сучасних умовах крім основного критерію – мінімізації витрат матеріалу на виготовлення необхідної готової продукції – план розкроювання повинен задовольняти й іншим вимогам [183]:

- з одної заготовки викроюються мінімальна кількість різних за довжиною штанг;

- штанги однієї довжини мають виготовлятися з якомога меншої кількості заготовок;

- при розкроюванні кожної заготовки різник має якомога менше разів переналаштовувати інструмент на нову довжину;

- по можливості застосовувати свій план розкроювання до кожної заготовки в залежності від її довжини та можливих відхилень заготовки від заданих технологічних параметрів.

Питання формулювання цільової функції оптимізації у прокатному виробництві автори розглядають неоднозначно. Так, в роботах [55, 57-62] мова йде про мінімальну кількість обрізків (технологічних втрат) на одиницю довжини прокатної продукції, тоді як інші [52, 63-69, 183] розглядають у якості цільової функції, що мінімізується, кількість металу (в кількості зливків, передільних заготовок чи по масі), які використовуються на виготовлення поточного замовлення.

Як показано в [52], це можливо лише за умови, що замовлення на готову продукцію, яке розглядається в якості поточного завдання, не перевищує за вагою металу одну плавку. Такий підхід, що, здавалося б, є надто обмежуючим, але за умови забезпечення сталості хімічного складу та інших властивостей сталі в послідовних плавках, а також з використанням машин безперервного лиття заготовок можна забезпечити таку послідовність плавок, яка за обсягом готового металу перевищуватиме будь-яке замовлення. Відтак, надалі розглядаємо в якості цільової функції саме мінімум металу, використаного на виконання поточного замовлення, яке не перевищує за масою масу поточної плавки.

В [57] та [58], розглядається ситуація, пов'язана з виконанням так званих «термінових» замовлень, які змушують змінювати план виготовлення продукції

(зазвичай тижневий з добовим та змінним уточненням) просто під час зміни. Розглядаються ситуації, коли певне «термінове» замовлення має починати виконуватися просто з поточної плавки, паралельно із замовленням, призначеним за планом на зміну чи навіть скоріше за нього. Умовою паралельного виконання кількох замовлень або переходу з виконання одного замовлення до іншого, крім однакової марки сталі, є однаковість поперечного переділу (типу) блюма, у який розкатується злиток. Застосування викладених в [57-59, 184] підходів не можливе на більшості вітчизняних металургійних виробництв технологічно. Втім, раціональним бачиться застосування двійково-цілочисельного підходу, коли для оптимального розкроювання кожної окремої передільної заготовки розглядається один або декілька оптимальних шаблонів розкроювання готової продукції на останньому етапі.

Також слід відзначити, що у більшості джерел [55, 57-62, 185], вага зливка, а відтак довжина, на яку він розкатується у вигляді блюму, є некерованою величиною. Тобто зливки надходять у прокат такими, як їх розлили, не передбачаючи той чи інший варіант розкрою наперед. Актуальною задачею в межах загальної науково-практичної проблеми вбачається розробка математичної моделі процесу поділу виплавленого металу на одиниці готової продукції у вигляді критерію мінімізації витрати металу на виконання кожного замовлення, а також вибору такого алгоритму, який би дозволяв вирішувати задачу оптимізації в реальному масштабі часу для невідомої заздалегідь довжини заготовки. Такий критерій мінімізації раціонально спрямувати саме на формування злитків заданої ваги в межах кожної плавки, аби на подальших етапах отримати продукцію наперед заданої оптимальної довжини, узгоджуючи при цьому паралельне виконання декількох замовлень [186].

В [58] наведений огляд методів розв'язання задач одновимірного розкроювання, що охоплює як одноетапні, так і двоетапні виробничі процеси. Наголошується, що варіювання довжинами розкроювання на першому етапі може суттєво знизити або взагалі виключити (при відсутності порушень технологічного процесу) втрати металу на другому етапі. Даний підхід

розвинутий в [59], де запропонована комбінована двійково-цілочисельна математична модель розкroювання блюма на передільні заготовки та готової продукції на штанги за умови стандартних (мірних) довжин штанг.

Також слід відзначити, що у [59], як і у більшості інших джерел, вага злита, а відтак довжина, на яку він розкатується у вигляді блюму, є некерованою величиною. Тобто зливки надходять у прокат такими, як їх розлили, не передбачаючи той чи інший варіант розкroю наперед.

Відомі ряд робіт щодо розкroювання матеріалів, в яких використовуються метод індексів Канторовича [60] або симплекс-метод Д. Данцига [61], а також його модифікації [62, 63]. Ці методи використовують для знаходження оптимального плану розкroювання, коли відомі всі можливі його варіанти. Слід зазначити, що робота зі складання всіх варіантів розкroювання (особливо коли довжина заготовок різниться, а сортамент готової продукції широкий) трудомістка та тривала. В підсумку будується задача лінійного програмування з великою кількістю невідомих, розв'язок якої на ПК стає досить складним.

Інший точний метод розв'язання задачі побудови плану одновимірного розкroювання, що розвиває ідею методу гілок та меж [64] має доволі обмежене коло застосування, оскільки потребує значних обчислювальних ресурсів уже при десятках варіантів штанг.

Евристичний підхід з генерацією послідовностей заготовок і їх обмінами за схемою Гоморі, наведений у [65], розглядає задачу розкroювання як одновимірну задачу оптимізації в дійсному просторі з наступним округленням результатів. Попри заявлені авторами високу продуктивність і точність у порівнянні з методом гілок та меж, запропонований алгоритм не передбачає виготовлення кількох видів продукції з одного виду заготовок.

В [66] вирішується задача мінімізації кількості злиwkів на виконання наперед відомого замовлення, при цьому одним з елементів цільової функції пропонується складова, відповідальна за мінімум переналаштувань різального механізму (мінімум різних довжин передільних заготовок, які викroюються з одного блюма). Для розв'язання пропонується застосовувати метод гілок та меж.

До іншого типу задач відноситься оптимізаційна проблема шихтування, тобто створення такої суміші рідких та сипучих матеріалів, які б дозволяли в процесі рафінації отримати сталь з потрібними характеристиками. Подібна задача вирішується в дійсному просторі має велику кількість обмежень [67] та може розглядатися як багатокритеріальна, де разом з критерієм мінімуму собівартості готової сталі можуть вживатися одразу кілька технологічних [68]. Для вирішення такого класу задач також існують як точні методи, так і наближені чисельні методи [69]. Серед точних методів вирішення даного класу задач найбільш вживані методи множників Лагранжа та методи, засновані на похідних [70].

Застосування точних методів в межах інформаційної технології, що розглядається, обмежене ресурсами часу і природою самої задачі. Адже при цілочисельності ряду змінних розв'язання задачі оптимізації без її врахування може привести до результатів, далеких від оптимуму [71]. Водночас для застосування точних методів необхідно приведення задачі до однокритеріальної, що в свою чергу передбачає попереднє вирішення задач на пошук мінімуму і максимуму за кожним критерієм і виконання згортки, що неприпустимо збільшує складність задачі [72]. Відтак, для розв'язання задачі нелінійної багатовимірної умовної оптимізації надалі пропонується використовувати еволюційні багатоагентні методи, багато з яких розглянуті в [73], зокрема генетичний алгоритм та еволюційна стратегія.

Серед великого класу еволюційних числових методів оптимізації до розв'язання розглянутих задач може бути застосований метод моделювання відпалу (англ. Simulated annealing, SA) [74], який однаково добре показує себе при розв'язанні і безперервних задач нелінійної оптимізації та водночас при розв'язанні комбінаторних задач – як двійкових, так і задач на перестановках. Іншим ефективним методом оптимізації для дійсного простору є метод рою часток (англ. Particle Swarm Optimization, PSO) [75], ефективний при вирішенні багатоестремальних задач. Однак, ці методи передбачають глобальну безумовну оптимізацію і доволі складний механізм врахування обмежень, а також мають

значну кількість параметрів, що мають встановлюватись емпірично і дуже суттєво впливають на ефективність пошуку рішення [76].

Великий клас ітераційних методів чисельної оптимізації, що мають назву штучні імунні системи (ШИС) імітують властивості природної імунної системи і засновані на принципах соматичної теорії [77] і мережевої гіпотези [78]. Соматична теорія стверджує, що збільшення різноманітності антитіл відбувається за рахунок соматичної рекомбінації і мутації генів. В рамках мережевої гіпотези обґрунтовується припущення, згідно з яким контроль розмноження клонів здійснюється в результаті взаємного розпізнавання антитіл, що функціонують як єдина мережа [77, 79 - 82]. В численних сучасних дослідженнях наголошується ефективність підходу на основі ШИС до розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації у дійсному та двійковому просторах [83-87]. Також обчислювальний метод, заснований на ШИС, добре сполучається з іншими обчислювальними методами локальної та глобальної оптимізації [83, 88, 89]. Перспективним напрямком подальших досліджень вважається розробка обчислювального методу на основі моделювання штучної імунної системи з механізмом адаптації до вирішуваної задачі [90], однаково ефективного для розв'язання багатокритеріальних задач умовної оптимізації у двійковому та дійсному просторах.

1.3.3 Моделі та методи підтримки прийняття рішень в процесах виплавки та розкислення сталі

Одним з найбільш розповсюджених способів виготовлення вуглецевої сталі в Україні є двопередільний, згідно з яким спочатку зі збагаченої руди виплавляють чавун, а потім зменшують вміст у розплаві вуглецю та інших домішок до заданого рівня шляхом продувки через метал кисню під тиском [91, 92]. Такий процес, з використанням конвертерів з верхньою продувкою, використовуються на ВАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь» (Маріуполь),

ПАТ «Арселор-Міттал Кривий Ріг», ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» (Кам'янське), Єнакіївському металургійному комбінаті, ПАТ «ДМЗ» (Дніпро) і на багатьох інших виробництвах [93 - 95].

Температура та хімічний склад чавуну, залитого в міксер перед подачею в конвертер, а також доступні характеристики брухту, скрапу, вапняку та руди (якщо остання використовується) частіше за все мають нечіткий характер. Природа невизначеності в даному випадку наступна [177]. Чавун подається в конвертер через міксер, який вирівнює хімічний склад кількох різних випусків доменної печі та забезпечує необхідну температуру подачі. Об'єм міксера зазвичай значно більший за величину порцій, якими його поповнюють і з яких беруть проби на хімічний аналіз. У кожній з порцій хімічний склад контролюється окремо, при цьому рівень шлаку не оцінюють. В більшості розрахункових моделей, проаналізованих у першому розділі, для спрощення, приймають усереднені значення параметрів, що мають невизначеність у сенсі їх математичного очікування.

Оскільки хімічного аналізу брухту, особливо зовнішнього походження, не виконується, а руда, вапняк та інші сипучі матеріали можуть мати суттєво різний склад у різних мірах об'єму, їх параметри також оцінюються візуально. Але слід розуміти, що параметри брухту можуть суттєво відрізнятися для кожної плавки. Останніми роками почастишали випадки «недобросовісного» збирання металобрухту, коли у матеріалі, що постачається у переробку, вміст власне заліза не перевищує 30–50%.

Оператор конвертера виконує шихтування плавки та рафінацією сталі виключно «на досвіді». Після завантаження шихти в конвертер він може керувати лише двома параметрами: висотою фурми, через яку подається кисень, та швидкістю подачі кисню. Задача прийняття рішень оператором передбачає виконання одразу кількох критеріїв: зробивши шихту якомога дешевшою, якомога швидше (з метою економії кисню) отримати розчин, кількість домішок у якому не вища за припустиму, а температура не виходить за межі рекомендованої для розливки.

Одним з факторів, властивих конвертерному виробництву, є великий вміст у розплаві вільного кисню та його сполуки з вуглецем у вигляді газових крапель (дисперсії). Задля зв'язування цих молекул і перетворення на рідкий шлак використовують спеціальні присадки – феросплави. Існує декілька різновидів феросплавів на основі марганцю, алюмінію та кремнію, що мають різну вартість та різні зв'язуючі властивості. Комбінуючи вміст окремих феросплавів, що додаються до киплячої сталі на заключному етапі її виготовлення та їх загальний об'єм, можна досягти бажаних показників якості готової продукції. При цьому слід зауважити, що питома вартість феросплавів значно вища за всі інші вихідні матеріали, тому головна математична задача, яка вирішується при їх застосуванні – оптимізація собівартості готової продукції, для якої необхідний хімічний склад сталі буде природним багатовимірним обмеженням.

Оператор конвертера виконує процес плавки виключно на досвіді, керуючи двома головними параметрами – висотою фурми, через яку подається кисень, та швидкістю подачі кисню. Його задача – якомога швидше (з метою економії кисню) отримати розчин, кількість домішок у якому не вища за припустиму, а температура не виходить за межі рекомендованої для розливки.

Після цього ванну нахилиють і зливають метал у ківш, де і відбувається розкислення. Під час розливання береться експрес-аналіз хімічного складу, за яким технолог має швидко (до 1 хвилини) прийняти рішення про кількість феросплавів та їх пропорцію, аби досягти бажаних властивостей сталі. Відсутність безпосередньої математичної моделі не дає змоги оцінити взаємний вплив параметрів при визначенні кількості розкислювачів по видах.

Математичні моделі, що описують процеси рафінації сталі та її розкислення пов'язують початкові умови (хімічний та ваговий склад шихти, наявність та якість матеріалів тощо) та керуючі впливи (можливі дії оператора) з вимогами до готового продукту, серед яких відсотковий вміст вуглецю, сірки, фосфору, марганцю, та інших легуючих елементів, а також температури, яка має обмеження згори і знизу [96 - 100].

Сучасний підхід до інтегрованого автоматизованого керування технологічним процесом плавки передбачає виділення як мінімум трьох задач керування, кожна з яких описується окремою моделлю й оптимізується за окремим критерієм якості [101, 102]. До початку плавки виконується статичний розрахунок плавки, в ході окислення розплаву (рафінування сталі) застосовується динамічна корегуюча модель, і, нарешті, після хімічного аналізу й контролю температури може здійснюватися додаткова коригуюча продувка із додаванням тих чи інших речовин [103 – 105].

Статична модель керування плавкою дозволяє розрахувати металеву частину шихти, оцінити кількість охолоджувачів та загальну кількість кисню для продувки плавки [106 – 109]. При цьому за доволі короткий термін (2-5 хвилин) після зливу попередньої плавки з конвертера у ківш, оператор конвертерного виробництва має сформувану шихтову суміш для виконання наступної плавки [107]. Актуальність оптимізації складу шихти, а саме масової частки чавуну, металобрухту, іншого скрапу, вапна, руди та інших матеріалів обумовлена високим ступенем конкуренції на ринку металопродукції. При цьому, як наголошено раніше, недостатньо зробити шихту мінімальної собівартості, важливо також врахувати досягнення теплового та матеріального балансу плавки, адже їх порушення може призвести до суттєвих додаткових втрат на охолодження чи підігрів готової сталі, на додаткове розкислення та вирівнювання рівню вуглецю. Як показали дослідження, додаткові витрати від перелічених факторів становлять від 1 до 3% собівартості розливої сталі [176].

Як показує поточна вітчизняна та зарубіжна практика [107, 109], статична модель і розрахунок на її основі можуть мати лише оціночний характер через суттєву невизначеність у початкових параметрах. Природа невизначеності докладно проаналізована в [110], а методам її врахування присвячені роботи [111 – 116]. Так, автори [111] пропонують статистичне моделювання роботи конвертера з вибором найбільш ймовірного його стану, у [112] натомість пропонується використання нечітких множин для оцінки вхідних параметрів, а у [113] – доповнювати класичні фізичні моделі хімічних та теплових процесів у

конвертері прямозв'язаною нейронною мережею для прогнозування результатів плавки. Загалом технології штучного інтелекту доволі широко застосовуються в світовій практиці, де поруч з нейронними мережами різних типів [114, 115] для формування оптимального керуючого впливу застосовуються генетичні алгоритми [116].

Через викладене, більшість [106–111, 117, 118] дослідників використовують додатково динамічну модель керування конвертерної плавкою. Основними координатами, якими оперують при цьому, є висота фурми на поверхню розплавленого металу та кількість й періодичність додавання охолоджуючих матеріалів. В [117] розроблена система керування температури у конвертері у складі автоматизованої системи керування технологічним процесом конвертерної плавки, що реалізує статичне, динамічне і замкнене керування. При цьому динамічна модель включає використання детермінованого підходу, статистичних поправок і позитивного досвіду керування на попередніх плавках.

Ще однією сучасною тенденцією в моделюванні плавки є використання машинного навчання та самонавчання [118–124]. Застосування нейро-нечітких моделей з самонавчанням типу ANFIS [118] та навчання на прикладах [119] забезпечує підтримку прийняття рішень для процесів рафінації сталі. Водночас для прогнозування результатів плавки та можливих аномальних відхилень різними авторами пропонується застосування радіально-базисних нейронних мереж [120, 121], предикативних моделей [122, 123], експертних оцінок [124] і навіть багатоваріантних часових рядів [125]. Як альтернатива даному підходу авторами [126] пропонується генерація великої кількості можливих сценаріїв керування плавкою з вибором кращого за синтетичним критерієм.

Розглянуті підходи мають суттєвий недолік, адже в більшості передбачають оптимізацію за технологічними, а не економічними критеріями якості, зокрема не враховують досягнення теплового й матеріального балансу плавки. При побудові й використанні моделі слід враховувати обмежений ресурс часу (від зливу попередньої сталі до завантаження наступної шихти у оператора є від 2 до 5 хвилин) та суттєву невизначеність вихідних даних.

Актуальним бачиться розробка такої математичної моделі оптимізації шихти при конвертерному виробництві, яка б враховувала умову матеріального та енергетичного балансу плавки, а також мінімізацію собівартості використаних феросплавів, як найдорожчої складової шихти. При цьому для забезпечення роботи системи підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності і суттєвих зовнішніх збурень актуальним є застосування в алгоритмі СППР керування плавкою систем самонавчання, орієнтованих на найбільш вдалі приклади попереднього ведення плавки.

1.3.4 Методи структурної та параметричної ідентифікації невідомих залежностей у задачах прийняття рішень

У процесах прийняття рішень при виробництві сортового прокату існують ситуації, у яких необхідно ідентифікувати залежності цільових характеристик готової продукції від ряду параметрів, що з одного боку визначають ці характеристики, а з іншого є наслідком прийняття рішень в попередніх технологічних операціях [127 – 129]. Сортовий прокат характеризується рядом фізичних властивостей, що регламентуються державними чи міжнародними стандартами для виробів з тої чи іншої марки сталі [130 – 132]: границя текучості, границя міцності, ударна пружність, границя витривалості та відносне здовження зразку при фіксованому механічному навантаженні. Всі ці характеристики входять до сертифікату готової продукції, який надсилається замовнику разом з готовою продукцією [178], що ілюструє рисунок 1.7.

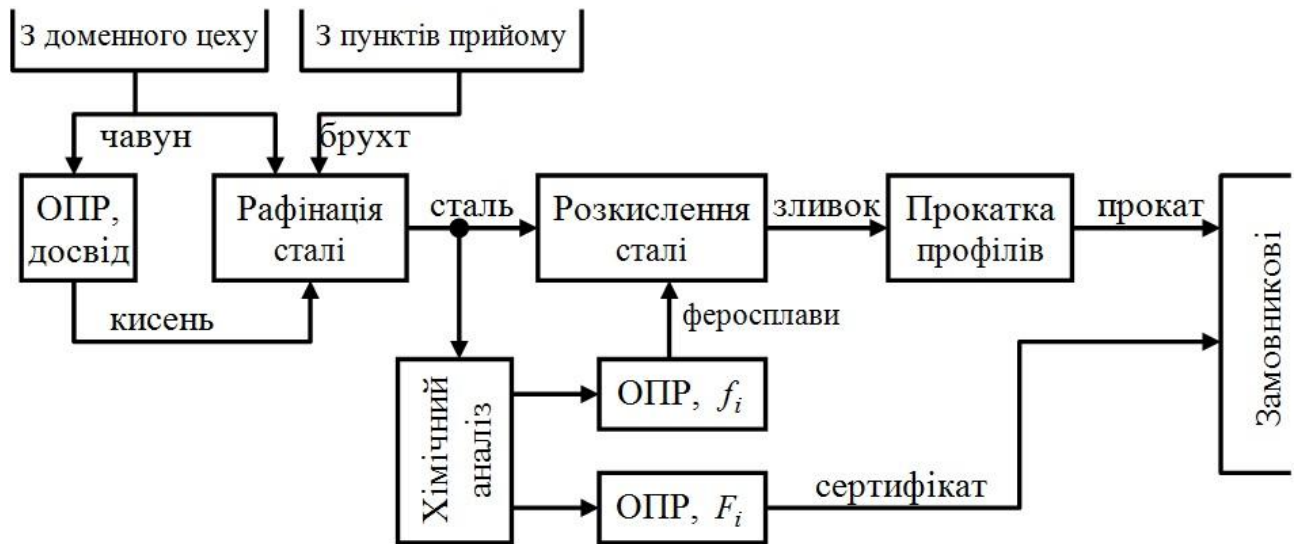


Рис. 1.7 – Технологічний процес виробництва сортового прокату конвертерним способом

Слід відзначити, що до моменту, коли безпосередніми вимірюваннями чи статистично виконується експертиза готової продукції, виконання будь-яких вимірів ускладнене, з одного боку – через високі температури розплаву та зливоків, а з іншого – такі виміри не дадуть повної картини механічних властивостей. Річ у тім, що сортовий прокат набуває властивостей у тому числі й після завершення усіх технологічних операцій – під час охолодження. Тому прогнозування механічних властивостей майбутньої готової продукції на ранніх етапах виготовлення вуглецевої сталі з метою формування таких керуючих впливів, які б могли скоригувати процес, що вже відбувається – складна актуальна задача, що поки що не отримала практичного рішення [179].

Водночас, як показують попередні дослідження [133, 134], ці величини можна спрогнозувати, використовуючи дані про хімічний аналіз розливої сталі та її температуру в момент розливки. В [180] показано, що майбутня марка сталі з надійністю 0,9624 визначається наступними одинадцятьма вимірами: вміст вуглецю, марганцю, кремнію, сірки, фосфору, хрому, нікелю, міді, титана та алюмінію в розчині при розливці та температурою розливки. Також отримана нейронно-мережева модель, що дозволяє прогнозувати марку сталі за вищезгаданими параметрами. Втім, така модель не дозволяє сформулювати

керуючий вплив у разі, якщо виплавляється нова марка сталі, на прикладах виготовлення виробів з якої нейронна мережа не навчалася.

Однією з актуальних задач прийняття рішень є задача збільшення тривалості міжремонтного періоду за рахунок точного прогнозування стану футеровки [187]. Тому традиційно велика увага приділяється підвищенню терміну між холодними ремонтами футеровки та прогнозуванню цього терміну [188].

Як показали дослідження технологічного процесу на базових підприємствах, ще на початку століття середня стійкість футеровки конвертерів в Україні ледь перевищувала 1000 плавок [135], у той час як на потужних конвертерних підприємствах країн СНД середня стійкість складала більше 2000 плавок [136], а світовий рівень, який вважався оптимальним з економічної точки зору, ще на кінець 1990-х років становив 3000-4000 плавок [189]. При цьому застосування значно дорожчих футеровок австрійського або німецького виробництва не забезпечує вищих показників тривалості, ніж застосування футеровки українського чи китайського виробництва [190].

Футеровка плавильного агрегату зношується під дією цілого ряду факторів, які в більшості обумовлені діяльністю оператора, що керує процесом плавки [135, 136]. В різних джерелах [137 – 140] згадуються від 12 до 26 факторів, що визначають стійкість футеровки, тобто час її роботи до планової безаварійної заміни. Попередній аналіз проблемної області [135, 136] показав, що всі фактори, які впливають на стійкість футеровки конвертера, можна поділити на технічні (якість застосованих вогнетривких матеріалів, схема кладки) та технологічні (якість чавуну, основність плавки, виконання додувок та способи догляду за футерівкою протягом кампанії).

Сучасні технології дозволяють здійснювати захист футеровки конвертерів методом факельного і напівсухого торкретування, отриманням конвертерних шлаків з високим вмістом магнію, шлаковим гарнісажем, шляхом роздування кінцевого конвертерного шлаку інертним газом (азотом) [191].

Коло факторів, що найбільше скорочують стійкість футеровки конвертера, окреслено ще у минулому столітті [192, 193]. Водночас, відомі й основні шляхи уповільнення розчинення футеровки. Основним технічним методом є збільшення вмісту в шлаку MgO [194]. Останнє досягається застосуванням при шлакоутворенні охолоджувачів, що містять оксид магнію (доломіт, доломітове вапно). Серед технологічних методів підвищення стійкості футеровки слід врахувати торкретування [195, 196] та шлакування [197]. Торкретування футеровки - це метод гарячого ремонту шляхом нанесення за допомогою торкрет-машин вогнетривкої маси на зношені ділянки футеровки. Стійкість футеровки може бути подовжена таким чином на 1000-2500 плавок [196]. Шлакування футеровки – набагато простіший спосіб зміцнення поверхні робочої зони, який полягає у розбризкуванні шлаку, що залишається після розливки плавки, на стінки конвертера. Нанесений шлаковий шар витримує не менше двох плавок [197].

Додатковим фактором, що суттєво впливає на тривалість роботи футеровки, на підприємствах повного циклу, що використовують рідкий чавун для виплавки сталі, є необхідність скачування шлаку під час плавки [198]. Вона обумовлена недосконалістю чавунного виробництва, яке не в змозі забезпечити стабільність показнику вмісту кремнію в межах 0,6-0,9% та небезпекою викидів з конвертера мас шлаку.

Втім, навіть маючи повний перелік факторів, що визначають тривалість роботи футеровки, побудова прогнозуючої моделі для визначення цього терміну, залишається доволі складною задачею. За допомогою парних кореляцій встановлено [136], що з усіх технологічних факторів найбільший вплив на стійкість периклазовуглищевої футеровки мають вміст MgO в шлаку і частка плавок з додувкою конвертера. Дещо менше корелюють з тривалістю роботи футеровки вміст кремнію в чавуні та вміст FeO в шлаку. При цьому більшість авторів сходяться на нелінійному характері залежностей, що досліджуються. Зокрема, у [195, 197] вказується на наявності точок перегину в залежностях стійкості футеровки від хімічного складу чавуну та охолоджувачів, а у [199] – на

необхідності встановлення раціональної межі кількості торкретувань, які не мають виконуватися після кожної плавки.

Отже, задача ідентифікації закономірностей процесу вигорання футеровки від технічних та технологічних факторів та залежностей, що їх описують, залишається актуальною.

Таким чином, важливою складовою інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень виробництва прокату мають бути параметричні моделі ідентифікації складних залежностей щодо механічних характеристик готової продукції та стійкості футеровки плавильного агрегату.

Структурній та параметричній ідентифікації моделей згаданих залежностей присвячено ряд робіт [141 – 143]. Умовно всі методи прогнозування розділяють на інтуїтивні та формалізовані. До інтуїтивних методів відносять методи експертних оцінок [144], метод історичних аналогій, нечіткі методи прогнозування [145, 146]. Широко використовуються генетичні методи та методи нейроматематики [147, 148]. Формалізовані методи, в свою чергу, поділяються на статистичні (насамперед регресійні моделі) [149] та структурні (нейромережеві моделі, моделі на основі класифікаційно-регресійних дерев тощо) [150, 151]. При розв'язуванні конкретної прикладної задачі важливо підібрати ефективний метод прогнозування, з використанням якого можна було б отримати найбільш точні результати.

Задачу ідентифікації невідомої залежності у загальному випадку можна сформулювати наступним чином

$$y = F(A, X) + \varepsilon \quad (1.1)$$

де $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)^T$ – вхідні змінні (фактори), k – кількість факторів, включених до моделі; $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$ – деякі параметри моделі, які необхідно відновити, n – кількість параметрів моделі; ε – помилка моделі.

У наукових джерелах пропонується велика кількість різних типів регресійних моделей. Так, наприклад, лінійна модель множинної регресії описується виразом:

$$y = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=1}^k a_{ij} \cdot x_j^{S_{ij}}, \quad (1.2)$$

де k – кількість змінних; M – кількість членів полінома; a_{ij} – коефіцієнти при складових полінома; S_{ij} – ступені аргументів.

Недолік подібного підходу обумовлений тим, що за його використання всі параметри розглядаються як повністю некорельовані, тобто кожна з функцій

$$f_j = \sum_{i=0}^n a_i x^i, \quad j = 1 \dots k, \quad (1.3)$$

є незалежною від усіх інших. Результуючий функціонал (1.2) будується фактично як сума функцій (1.3), отриманих кожна методом найменших квадратів (МНК) [152].

Оскільки початково аналітичний вид залежності (1.1) невідомий, то в процесі її визначення необхідно розв'язувати задачі структурної та параметричної ідентифікації. Застосування класичного методу, заснованого на МНК має додатковий недолік. Оскільки більшість шуканих залежностей є суттєво нелінійними, результуючі моделі матимуть по 30–50 коефіцієнтів. Для відновлення таких залежностей з високою надійністю та малим довірчим інтервалом необхідно мати вибірки даних про тисячі, а іноді й десятки тисяч плавок, враховуючи різноманітність типів готової продукції, що сертифікується.

Одним з відомих методів, який успішно використовується при розв'язуванні задач структурно-параметричної ідентифікації складних об'єктів, процесів та систем за результатами спостереження в умовах неповної інформації, є метод групового урахування аргументів (МГУА), розроблений Івахненком О.Г. [153]. Подальшого розвитку МГУА отримав в роботах Степашка В.С. [154, 155], Зайченка Ю.П. [156] та інших вчених. За своєю природою МГУА є методом індуктивного моделювання, в основі якого лежить принцип автоматичної генерації варіантів, послідовної селекції моделей і зовнішніх критеріїв для побудови моделей оптимальної складності [157, 158].

Обійти недоліки моделі, що застосовується, дозволяє застосування для апроксимації керованої змінної від певного набору параметрів моделі узагальнених прогнозуючих поліномів вигляду

$$y = \sum_{i=0}^{M-1} a_i \cdot \prod_{j=1}^k x_j^{S_{ij}} \quad (1.4)$$

В (1.4), як і в (1.2), ступені, у яких предиктори входять до моделі, – натуральні числа, але водночас присутні й добутки параметрів.

Відомі ряд методів, що дозволяють отримати коефіцієнти полінома для будь-якого заданого критерію якості апроксимації, наприклад, критерію регулярності або мінімального зміщення [151]. Зокрема, комбінаторний алгоритм дає можливість отримати запис шляхом викреслювання певних складових з повного поліному, а згаданий метод групового урахування аргументів – навпаки, поступово ускладнює модель на основі елементарних поліномів першого–другого порядку [153].

Проблема комбінаторного алгоритму в застосуванні до розглянутої задачі полягає у так званому «проклятті розмірності»: для k змінних, кожна з яких може виступати у ступенях від 0 до m , необхідно переглянути $m^k + 1$ різних поліномів, відновивши для кожного коефіцієнти методом найменших квадратів. Останнє нереально не тільки з точки зору часу, а й виходячи з того, що починаючи з певного порядку матриці коефіцієнтів стануть погано обумовленими і безпосереднє рішення системи матричних рівнянь в МНК виявиться неефективним.

З точки зору швидкості й простоти синтезу моделей МГУА, звичайно, має перевагу. Втім для вирішення даної задачі застосування цього універсального методу призводить до різкого зростання ступенів поліномів. Зокрема, при застосуванні найпростішої форми базової моделі другого порядку

$$f(x_1, x_2) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 \quad (1.5)$$

вже на третьому кроці самоорганізації серед кращих моделей опиняються такі що містять складові п'ятого, шостого і так далі порядків, коефіцієнти при яких,

відповідно мають розмірність тисяч і десятків тисяч, що спотворюють реальні фізичні залежності.

Таким чином, аналіз методів структурної та параметричної ідентифікації дозволяє зробити висновки про існуючі два підходи до побудови моделей: інтуїтивний і формалізований. Перший дозволяє додатково до невідомих коефіцієнтів структурно визначеної моделі також підібрати її оптимальну структуру на основі зовнішнього критерію якості. В другому випадку задачі ідентифікації структури моделі та відновлення її параметрів можуть виконуватись окремо відомими методами, неодноразово реалізованими у сучасних інформаційних системах керування виробництвом.

Відтак, актуальною задачею в межах загальної науково-практичної проблеми дослідження вбачається побудова моделей прогнозування характеристик і сертифікації готової продукції, які б дозволяли без втрати точності мінімізувати порядок і складність моделі.

1.4. Розв'язання задач умовної оптимізації з використанням методу моделювання штучних імунних систем (ШИС)

З викладеного раніше слідує, що задача інтелектуальної підтримки прийняття рішень в багатоетапному виробництві прокату передбачає вирішення цілого ряду задач відносно окремих технологічних процесів, в тому числі задач прогнозування, оптимізації, формування рекомендацій та відновлення математичних залежностей. Узагальнена інформація про задачі, їх тип та класифікацію наведена у таблиці 1.2.

Як видно з таблиці 1.2, в більшості технологічних операцій вирішуються одно- або багатofакторні задачі умовної оптимізації. Для розв'язання цих задач пропонується універсальний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи (ШИС) людини.

Таблиця 1.2 – Класифікація задач, що вирішуються в рамках інформаційної технології

| № з/п | Задача (процес) | Тип задачі | Класифікація задачі |
|-------|---|--|---|
| 1 | Планування замовлень | Оптимізація | Багатокритеріальна комбінаторна задача умовної оптимізації на перестановках |
| 2 | Шихтування | Оптимізація | Багатокритеріальна дійсночисельна задача умовної оптимізації |
| 3 | Рафінація сталі | Підтримка прийняття рішень | Самонавчання на прикладах з формуванням рекомендацій у вигляді сценаріїв-зразків |
| 4 | Розкислення сталі | Підтримка прийняття рішень | Самонавчання на основі байєсовської мережі з наступною однокритеріальною умовною оптимізацією |
| 5 | Розливка сталі | Оптимізація | Однокритеріальна комбінаторна задача оптимізації на двійкових матрицях |
| 6 | Розкроювання заготовок і кінцевої продукції | Оптимізація | Багатокритеріальна цілочисельна комбінаторна задача умовної оптимізації |
| 7 | Контроль стану футеровки | Прогнозування і підтримка прийняття рішень | Формування зворотного висновку за факторною регресійною моделлю |

1.4.1 Сутність методу моделювання ШС

Природна імунна система вищих ссавців має ряд цікавих властивостей і можливостей обробки інформації, включаючи здатність до розпізнавання антигенів, вироблення антитіл і навчання на основі клітин пам'яті. Оскільки структура антигенів, які потрапляють в організм, заздалегідь не відома, в організмі в результаті випадкового перегрупування генів утворюється величезна кількість різних типів антитіл. На основі аналізу відповідності біохімічної структури антигену і антитіл з цієї множини варіантів відбувається відбір єдиного типу антитіл, необхідного для успішного знищення антигену. Завдання імунної системи полягає у виборі серед множини варіантів такого типу антитіл, який краще всього відповідає даному антигену. Отже, імунна відповідь можна розглядати як процес вирішення завдання комбінаторної оптимізації [200].

З математичної точки зору підтримання різноманіття в імунній системі можна трактувати як задачу оптимізації мультимодальної функції, що має кратне (не єдине) рішення. В даному розділі розглянуто метод, який забезпечує можливість одночасного зберігання кількох векторів пошуку для знаходження кратних рішень. Антиген можна розглядати як задачу, яку необхідно вирішити, а антитіло - як вектор, найкращим чином відповідний її рішенням. Запропонований нижче імунний алгоритм (IA) імітує властивості природної імунної системи і заснований на принципах соматичної теорії [77] і мережевої гіпотези [78].

Соматична теорія стверджує, що збільшення різноманітності антитіл відбувається за рахунок соматичної рекомбінації і мутації генів. В рамках мережевої гіпотези обґрунтовується припущення, згідно з яким контроль розмноження клонів здійснюється в результаті взаємного розпізнавання антитіл, що функціонують як єдина мережа [77, 201-205].

На рисунку 1.8 показана робота імунної системи з точки зору процесів обробки і управління інформацією. Користуючись цією схемою, інформаційні процеси в імунній системі можна представити у вигляді алгоритму, який вкладається у наступну послідовність формалізованих кроків [206]:

Крок 1. Розпізнавання антигену. Цей процес відповідає встановленню вигляду задачі оптимізації.

Крок 2. Генерація антитіл клітинами пам'яті. Це відповідає використанню успішного вирішення аналогічної задачі (нехай, і для іншого антигену) в минулому.

Крок 3. Обчислення афінності (приспосованості). На основі величини приспосованості відбираються такі антитіла, які найбільше відповідають антигену, що еквівалентно пошуку оптимального рішення.

Крок 4. Диференціювання лімфоцитів. Частина антитіл стають клітинами пам'яті, решта – супресорами (нащадками поточного покоління). Це можна інтерпретувати як збереження відповідного рішення для наступного кроку пошуку.

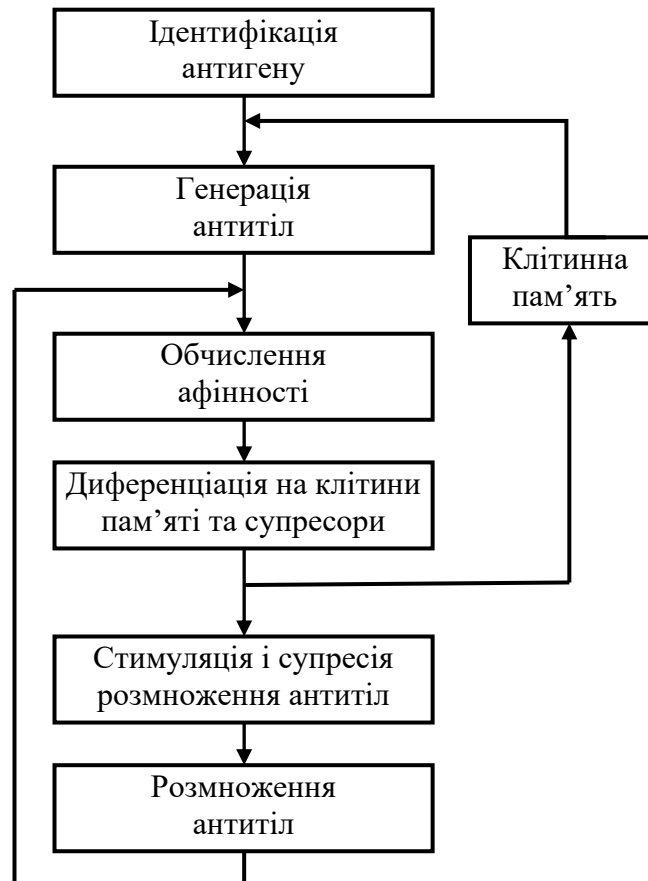


Рис. 1.8 – Механізм формування антитіл в імунній системі

Крок 5. Стимулювання і придушення антитіл. Антитіла клонуються і мутують в залежності від пристосованості. Поряд з відстеженням локальних максимумів це відповідає підтриманню розмаїття напрямів пошуку.

Крок 6. Розмноження антитіл. Нове покоління доповнюється антитілами, згенерованими на основі клітин пам'яті.

У природі описаний процес є безперервним - антитіла виробляються організмом як до зустрінутого антигену, так і до можливих його варіантів (мутацій) [200]. При моделюванні процесу на комп'ютері роботу алгоритму можна зупинити після певної кількості поколінь [202], через заданий наперед час [205] або після певної кількості поколінь, протягом яких пристосованість антитіл не підвищується [203, 204].

Аби уникнути непорозумінь, введемо позначення та дамо визначення декількох спеціальних термінів, які раніше не зустрічалися.

Насамперед, повторимося, що надалі розглядається задача умовної оптимізації скалярної цільової функції $f(X)$ дійсних змінних $x_i \in X$, заданих на області припустимих значень D

$$f^* = f(X^*) = \min_{X \in D \subseteq R^n} f(X), \quad (1.6)$$

де n – розмірність вектора X .

Загальна кількість обмежень, що визначають область D позначимо через N_D . Надалі, якщо не зазначено протилежне, умова $N_D = \emptyset$ фактично означає виконання безумовної оптимізації – окремий випадок загальної постановки (1.6), у якому $D = R^n$.

Узагальнено надалі приймаємо, що область пошуку визначена у вигляді паралелепіпеду

$$D = \{x_i \mid x_{i,\min} \leq x_i \leq x_{i,\max}, i \in [1:n]\}, \quad (1.7)$$

де $x_{i,\min}$ та $x_{i,\max}$ - наперед задані константи, в загальному випадку індивідуальні для кожного виміру i .

Надалі специфічні терміни, запозичені з біології, приймаємо у наступному сенсі [77]:

- клітка (антитіло) – рішення $X \in R^n$;
- афінність – величина, що позначає корисність клітини й обраховується як величина цільової функції, взята з протилежним знаком;
- популяція – множина клітин, що приймають участь у процесі оптимізації на даному етапі;
- клон – клітина, утворена з іншої, шляхом її повного дублювання;
- мутація – випадкова зміна компонентів вектора X за певним законом.

Надалі в формулах та описі методу оптимізації застосовано наступні позначення:

X – клітина;

$f(X)$ – значення цільової функції, що відповідає клітині X ;

$P = \{X_j, j \in [1: N_p]\}$ – популяція клітин потужністю N_p ;

$x_{j,1}, x_{j,2}, \dots, x_{j,i}, \dots, x_{j,n}$ – компоненти клітини $X_j \in P$, що існує у просторі n вимірів (координат);

$\varphi_j = -f(X_j)$ – афінність (корисність) клітини X_j ;

M – популяція клітин пам'яті (не є частиною популяції P);

C_j – множина клонів (нащадків) клітини X_j , що утворюються на поточній ітерації методу;

$C = \{C_j, j \in [1: N_p]\}$ – множина клонів (нащадків) усіх клітин, що створені на поточній ітерації методу;

$C_i^{X_j}$ – i – тий клон (нащадок) j – тої клітини;

$C_{best}^{X_j}$ – найкращий у поколінні клон клітини X_j (той, якому відповідає найменше значення цільової функції та, відповідно, найбільша афінність);

n_c – кількість клонів, що утворюються з кожної клітини популяції;

f^* – мінімальне значення цільової функції, знайдене методом;

\tilde{f}^* – статистичне значення оцінки математичного очікування мінімального значення функції при випадковому запуску;

\tilde{n}^* – статистичне значення оцінки математичного очікування кількості викликів цільової функції до завершення алгоритму при випадковому запуску.

Таким чином, метод моделювання штучної імунної системи незалежно від його реалізації передбачає роботу з популяцією клітин, кожна з яких є вектором у просторі незалежних змінних.

Основними (базовими) операторами, які використовує метод моделювання штучної імунної системи є оператори клонування, мутації, клонального відбору та стиснення популяції.

Клонування є створенням для кожної з клітин поточного покоління множини її копій

$$C_j = \{X_j^{C_i} : X_j^{C_i} = X_j, i \in [1:n_c]\}. \quad (1.9)$$

В свою чергу мутація є зміною клітини випадковим чином

$$X_{j,k}^{C_i} = X_{j,k}^{C_i} + \Delta_{j,k}, k \in [1:n], \quad (1.10)$$

де $\Delta_{j,k}$ - крок мутації, у загальному випадку індивідуальний для кожного виміру k . Вибір кроку й характеру мутації визначає особливості різних реалізацій методу моделювання штучних імунних систем.

Оператор клонального відбору передбачає заміщення поточної популяції кращими з нащадків, які пройшли процедури клонування та мутації

$$X_j = \begin{cases} X_j, & \text{if } f(X_{best}^{C_i}) > f(X_j) \\ X_{best}^{C_i}, & \text{if } f(X_{best}^{C_i}) \leq f(X_j) \end{cases} \quad (1.11)$$

Оператор стиснення популяції вилучає надлишковість популяції, виключаючи гірше з близьких рішень, що задовольняють вимозі

$$\|X_a - X_b\| < r, \quad a \neq b, \quad a, b \in [1:N_p]. \quad (1.12)$$

де r – певний поріг близькості (визначається мірністю простору та особливостями реалізації алгоритму); $\|\cdot\|$ – символ норми, яка в залежності від метрики простору може обчислюватись тим чи іншим шляхом (для дійсного простору використовують евклідову відстань).

Множина пам'яті M містить певну фіксовану кількість різних кращих рішень, знайдених за весь час роботи алгоритму. Клітини з пам'яті використовуються як службові при формуванні нового покоління.

Оператори клонування та мутації забезпечують випадковий локальний пошук в околі кожної з клітин подібно до відомих раніше еволюційних стратегій. Оператор стиснення популяції дозволяє прискорити сходження методу і скорочення обчислювальних затрат. Застосування клітин пам'яті дозволяє не втратити область глобального оптимуму при випадковому пошуку.

1.4.2 Відомі реалізації методу моделювання ШС, їх особливості та обмеження

Історично першою реалізацією моделювання штучних імунних систем була запропонована у [203] ідея використовувати механізм імунного відбору для розпізнавання образів. Пізніше ту ж ідею було використано й для рішення задач оптимізації. Найбільш повний аналіз теорії базового підходу до побудови оптимізаційного алгоритму та його гібридизації з іншими обчислювальними схемами викладений в [207, 208].

Метод CLONALG [203] використовує всі основні принципи моделювання штучних імунних систем: наявність клітин пам'яті, селекцію і клонування найбільш корисних антитіл, мутацію, виключення найменш корисних антитіл, вибір клонів пропорційно їх корисності та забезпечення збереження кращих рішень. Водночас CLONALG має ряд недоліків, які визначають обмеження в його роботі. Насамперед, метод вкрай залежний від вибору параметрів t та ρ , вибір яких, у свою чергу, залежить від вигляду цільової функції та мірності простору задачі. По-друге, метод CLONALG, хоч і використовує клітини пам'яті для зберігання кращих рішень, втім не передбачає їх використання для генерації нових антитіл. Нарешті, метод не використовує оператор стиснення популяції, через що виконується велика кількість звернень до цільової функції для обрахунку схожих рішень.

Деякі недоліки CLONALG долає метод opt-AiNet, головною особливістю якого є збереження всіх знайдених локальних і глобальних оптимумів цільової функції. Метод використовує динамічний розмір популяції, керований механізмом стиснення [205]. В роботі [209] рекомендовані значення вільних параметрів методу opt-AiNet для оптимізації задач малої і середньої розмірності та показано його значну перевагу над CLONALG у швидкості отримання порівняного за афінністю рішення.

Іншим відомим розвитком методу CLONALG є алгоритм BCA (B-cell algorithm), заснований на принципі клонального відбору [206]. Алгоритм

орієнтований на пошук глобального оптимуму цільової функції, що має складний ландшафт, і може забезпечити високу ефективність пошуку при невеликих розмірах початкової популяції $N_p = 3 \div 5$. Особливістю методу є використання оператора так званої суміжної гіпермутації (continuous somatic hypermutation), який припускає мутацію не окремих випадкових компонентів клітини, а комплексно – одночасно по кількох координатах. Аналіз роботи алгоритму ВСА в порівнянні з наведеними вище алгоритмами показує його вищу надійність сходження до глобального оптимуму багатовимірної багато екстремальної функції. Однак, часові витрати на отримання якісного рішення дещо більші ніж в попередніх алгоритмах і не порівняно вищі, ніж у класичних алгоритмів цілеспрямованого пошуку [202].

При вирішенні багатьох прикладних задач зі застосуванням моделювання імунних систем знайшов застосування метод НІА (Hybrid Immune Algorithm), запропонований в [206] в удосконалений в [209]. Його можна розглядати як модифікацію методу opt-AiNet. На відміну від останнього, розмір популяції в методі НІА залишається постійним в процесі всього ітераційного процесу, кожна з клітин має додатковий атрибут, званий віком клітини, а мутацію клонів здійснюють двома способами незалежно для кожної компоненти клітини, або тільки для однієї її компоненти. Метод НІА у порівнянні з попередніми демонструє надійність пошуку глобального оптимум багатоекстремальних функцій за доволі обмежений час. Він потребує для досягнення однакової точності в рази менше часу й на порядок менше ітерацій, ніж opt-AiNet.

Ще один адаптивний метод оптимізації I-opt-AiNet являє собою модифікацію методу opt-AiNet [210]. Центральним поняттям методу є «краща середня корисність за всі попередні ітерації». Для того, аби запобігти повторним ресурсомістким обчисленням корисності клітин, в процесі роботи алгоритму, ті клітини, значення корисності яких одного разу вже було обчислено, позначають як «обчислені». Клонування клітин здійснюється пропорційно їх нормованій за Севіджем корисності. Мутація клонів виконується за схемою алгоритму opt-AiNet з використанням розподілу Гаусса. Отриманий клон помирає одразу, якщо

не лежить у заданій області пошуку. З отриманої популяції виключаються ті клітини, корисність яких нижче кращого середнього. Нове покоління доповнюється випадково згенерованими клітинами, що лежать в усій області пошуку. Загальний розмір популяції при цьому не фіксований. Як і в інших методах, що реалізують загальну схему підходу моделювання імунних систем, перевагою даного методу є отримання не одного, а одразу кількох рішень, що можуть використовуватись в подальших процесах управління, а також оцінок якості цих рішень. У порівнянні з іншими методами ШС I-opt-AiNet на порядок менше разів звертається до цільової функції за рахунок відкидання рішень, що не належать області пошуку, а також «помітки» раніше обчислених точок простору. Головний недолік даного алгоритму – невикористання у явному вигляді множини пам'яті для зберігання корисної інформації про вже знайдені вдалі рішення. Алгоритм у порівнянні з іншими імунними алгоритмами має надмірну стохастичність, яка зводить нанівець перевагу його швидкості.

Ще однією відомою реалізацією ШС є метод T-Cell Model. На відміну від розглянутих вище алгоритмів, він від початку призначений для вирішення лише задач умовної оптимізації [211]. Аби підвищити ймовірність локалізації глобального екстремуму цільової функції, метод T-Cell Model використовує так званий динамічний допуск, сенс якого полягає у визначенні відносної величини припустимого порушення обмежень. Динамічний допуск дозволяє якомога точніше обстежити область на її границях, адже у задачах умовного нелінійного програмування саме там найчастіше знаходяться екстремальні значення функцій [212]. То того ж, в ряді випадків до оптимального рішення набагато зручніше «підійти» саме із забороненої області, у той час коли навіть суттєве наближення від центру області припустимих значень не вказує на можливу наявність екстремуму. Оператор мутації в згаданому алгоритмі має доволі складну форму і використовує динамічну ймовірність мутації для різних типів клітин. Авторами [211] пропонуються налаштування алгоритму, за яких за відносно невеликий час $T_{\max} \leq 1000$ поколінь досягається рішення навіть найскладніших задач з кількома нелінійними обмеженнями. Основні недоліки запропонованого

алгоритму – перехід від безперервного простору рішень до дискретного генотипу клітин та низька варіативність оператора мутації (кожна клітина на кожній ітерації народжує лише одного клона, з яким і змагається в ході наступного кроку стиснення).

Також методам моделювання штучних імунних систем та їх застосуванню для оптимізації виробничих процесів присвячені роботи [213-217], у яких запропоновані різні методики вирішення комбінаторних проблем та задач умовної оптимізації у дійсному просторі. Водночас актуальною залишається задача розробки такого методу оптимізації, який одночасно був би ефективний для обох типів задач та реалізовував би одночасно взаємодію між пошуковими агентами, клональну селекцію і стиснення популяції, а також був би адаптивним до рельєфу цільової функції та мірності простору.

1.5 Висновки до розділу 1

Узагальнюючи вище викладене можна зробити наступні висновки:

1. Багатоетапне виробництво сортового прокату ґрунтується на технологічному циклі, що складається з кількох операцій, розділених у часі, територіально, а також за виконавцями. Досвід роботи вітчизняних та зарубіжних підприємств показує, що оптимальне налаштування систем керування кожною технологічною операцією чи ланкою не забезпечує оптимальність загального виробничого процесу. Це зумовлено несумісністю оптимальних рішень для окремих систем та відсутністю інтегрованої системи, яка б керувала роботою всього підприємства за глобальним економічним критерієм.

2. Дослідження, які стосуються автоматизації багатоетапних процесів виробництва прокату, розглядають у якості об'єкту автоматизації окрему операцію, що є частиною загального виробничого процесу. Виконаний аналітичний огляд дозволяє зробити висновок, що необхідний перехід на вищий

рівень абстракції для побудови та вдосконалення моделей і методів планування та керування виробництвом прокату на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв. Необхідно також синтезувати критерії та обмеження в математичних моделях як всього процесу, так і його частин для вирішення ряду оптимізаційних задач.

3. Підтримка прийняття рішень в багатоетапному виробництві прокату потребує вирішення ряду одно- або багатofакторних задач умовної оптимізації, ефективним для розв'язання яких є обчислювальний підхід на основі моделювання штучної імунної системи людини, що забезпечує отримання сімейства субоптимальних рішень за гарантований час. Відтак перспективним напрямком подальших досліджень вважається розробка обчислювального методу на основі моделювання штучної імунної системи з механізмом адаптації до вирішуваної задачі, однаково ефективного для розв'язання безперервних та комбінаторних задач умовної оптимізації.

4. Прийняття рішень в конвертерному виробництві при керуванні процесами рафінації та розкислення сталі відбувається в умовах невизначеності та суттєвих зовнішніх збурень і має значний вплив «людського фактору». Для мінімізації впливу цих негативних чинників в складі інтегрованої СППР керування та планування виробництва прокату перспективним вбачається застосування методів самонавчання, орієнтованих на найбільш вдалі приклади попередніх рішень.

5. Існуюча методика прямої сертифікації готової продукції для отримання механічних властивостей прокату передбачає тривалі, вартісні та енергоємні операції й виконується після завершення всіх технологічних операцій. Водночас існуючі методи структурно-параметричної ідентифікації процесів при сертифікації продукції у прокатному виробництві передбачають встановлення невідомих коефіцієнтів структурно визначених моделей. Це обумовлює необхідність застосування в складі інтегрованої СППР виробництва прокату процесу ідентифікації оптимальної структури моделі та її параметрів одночасно на основі зовнішнього критерію якості.

6. Таким чином, невирішеною науковою проблемою є обґрунтування принципів та розробка методів і засобів створення інтегрованих систем інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в задачах прогнозування та керування процесами багатоетапного виробництва сортового прокату шляхом розробки комплексу математичних моделей цих процесів, методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень з використанням узагальнених економічних критеріїв.

З рахуванням викладеного, надалі необхідно вирішити наступні задачі дослідження:

1. Розробити математичні моделі розв'язання:

-- задачі побудови оптимального розкладу виконання замовлень на продукцію металургійним підприємством повного циклу при широкому сортаменті з використанням узагальненого економічного критерію у вигляді багатокритеріальної задачі умовної оптимізації;

-- задачі оптимізації шихти при конвертерному виробництві з обґрунтуванням вигляду критерію оптимізації собівартості сталі на етапі її виплавки, враховуючи додаткові витрати на встановлення теплового та матеріального балансу;

-- задачі прогнозування механічних властивостей майбутньої готової продукції на ранніх етапах виготовлення вуглецевої сталі з метою формування таких керуючих впливів, які б могли скоригувати процес, що вже відбувається;

-- задачі оптимізації ваги зливку з огляду на перебіг технологічного процесу в майбутніх переділах;

-- задачі оптимізації розкрюювання заготовок у багатоетапному прокатному виробництві з використанням критерію мінімуму залишків для задалегідь невідомої довжини заготовки.

2. Запропонувати методи навчання та побудови інтелектуальних підсистем для підтримки прийняття рішень оператором конвертерного виробництва в процесах рафінації, розкислення та розливки сталі, на основі вибору і

усереднення кращих прецедентів з історії виконання попередніх замовлень, найближчих за нормалізованою метрикою.

3. Розробити ефективний метод ідентифікації закономірностей процесу вигоряння футеровки від технічних та технологічних факторів та синтезувати систему математичних й логічних залежностей, що їх описують.

4. Розробити адаптивний еволюційний метод оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи, що уникає недоліків існуючих реалізацій та використовує адаптивні до задачі оператори мутації, схрещування та стиснення популяції. Застосувати розроблений метод як складову інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування металургійним виробництвом для розв'язання задач умовної оптимізації у різних просторах.

5. Обґрунтувати структуру та загальні принципи роботи і навчання інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування багатоетапним металургійним виробництвом. Визначити структуру вхідної та вихідної інформації, перелік задач, що виконуються інтегрованою системою. Розробити спосіб взаємодії системи підтримки прийняття рішень та операторів виплавки та розливки сталі, а також розкроювання заготовок на різних переділах з механізмом навчання для формування керуючих рекомендацій.

6. Реалізувати прототип інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для планування та керування виробництвом прокату та виконати її апробацію на реальних даних, що описують виробничі процеси на металургійних підприємствах. Визначити адекватність запропонованих моделей та алгоритмів, обмеження на їх використання та можливі шляхи вдосконалення.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА КОМБІНАТОРНИХ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ БАГАТОЕТАПНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ

Як зазначено раніше, більшість відомих підходів до оптимізації роботи виробництва прокату виконується на рівні окремих операцій, що є частинами загального виробничого процесу. В даному розділі пропонуються ряд математичних моделей, які описують виконання замовлень на виготовлення сортового прокату металургійним підприємством, а також налаштування окремих його виробничих ділянок на мінімізацію глобального економічного критерію роботи. В якості останнього обрано витратний коефіцієнт металу.

Запропоновані в даному розділі математичні моделі є основою систем керування окремими операціями, що в свою чергу є складовими інтегрованої системи підтримки прийняття рішень виробництва прокату. Їх використання передбачає врахування при прийнятті рішень стосовно окремої технологічної операції тим чи іншим виконавцем всього комплексу операцій технологічного циклу та глобального стану підприємства по відношенню до виконання всієї множини поточних замовлень.

2.1. Математична модель оптимального планування виконання замовлень при широкому сортаменті

Розглянемо математичну постановку задачі. Кожне замовлення Ω має кілька атрибутів, ключовими з яких є його об'єм, вид продукції, ціна, час виконання, а також додаткові логістичні вимоги щодо пакування, маркування, сертифікації та супроводу вантажу. Представимо це у вигляді сукупності числових характеристик

$$\Omega = \langle C, P, W, T, Tx, Dx \rangle, \quad (2.1)$$

де C – ціна за тону продукції; P – собівартість виконання замовлення з урахуванням додаткових вимог; W – обсяг замовлення у тонах; T – час, що дається на виконання замовлення; Tx – (може бути відсутній) додатковий час, упродовж якого замовлення може бути виконано з певним штрафом Dx , після ж цього часу замовлення вважається втраченим.

Якщо в момент прийняття рішень розглядається m заявок, що очікують виконання, то скінченна множина можливих рішень S складається з усіх можливих перестановок послідовності обробки цих замовлень

$$S = \{s_j = (\Omega_{1,j}, \Omega_{2,j}, \dots, \Omega_{m,j}), j = \overline{1, M}\}, \quad (2.2)$$

де j – тий варіант перестановки s_j замовлень, описаних згідно (3.1); $M = m! = |J|$ – загальна кількість таких варіантів, що дорівнює можливій кількості перестановок на $J = \{1, \dots, m\}$.

Враховуючи (2.2), задача оптимізації плану виконання замовлень при широкому сортаменті готової продукції має вигляд

$$s^* = \arg \min_{s_j \in S} F(s_j), \quad (2.3)$$

де $F(s_j)$ – цільова функція оптимізації, що має часовий або (частіше) матеріальний вимір, і включає розглянуті нижче чотири види небажаних втрат.

Звичайно, кожна комбінація параметрів, що описують готову продукцію в замовленні визначається певним стандартом – вітчизняним чи міжнародним. Застосовуючи згадані стандарти для множини можливої $G = \{1, \dots, K\}$ найменувань готової продукції даного підприємства з урахуванням його технологічних можливостей, легко отримати матрицю $Q_{n \times n}$ часових витрат при переході від виготовлення одного виду продукції до іншого. Вочевидь, якщо доповнити нею опис (2.1), отримаємо сукупність замовлень

$$\Omega = \langle C, Q, P, W, T, Tx, Dx \rangle. \quad (2.4)$$

При цьому $q_{a,b}$ може показувати як час переходу від виконання a – того замовлення до b – того, так і матеріальні витрати на здійснення такого переходу.

Відповідна складова матеріальних витрат від втрати часу на переходи має бути включена до складу цільової функції $F(s_j)$, що входить в (2.3).

Так само мають бути враховані економічні витрати на виконання операцій, що не є обов'язковими для продукції й виконуються залежно від конкретного замовлення (приклад – операції 9 та 10 в табл. 1.1). Пропонується включити їх в собівартість продукції по замовленню p_i , яка надалі пов'язується саме із замовленням $i = \overline{1, m}$, а не з видом продукції $g = \overline{1, g_{max}}$.

Для спрощення пропонується прийняти, що замовлення одного клієнта k на різні види продукції є різними замовленнями i_k , що не можуть виконуватись одночасно. Так само замовлення на однакову продукцію g , що надійшли від різних клієнтів є окремими замовленнями i_g . Тобто, серед m замовлень, всі є різними за логічним поєднанням клієнта та виду продукції.

Враховуючи перелічені припущення, цільова функція оптимізації набуває вигляду

$$F(s_j) = \sum_{i=1}^{m_1} F_{H,i}^j + \sum_{i=m_1+1}^{m_1+m_2} F_{T,i}^j + \sum_{i=m_1+m_2+1}^{m_1+m_2+m_3} F_{L,i}^j + F_Q^j, \quad (2.5)$$

де $m = m_1 + m_2 + m_3$ – загальна кількість замовлень; m_1 – кількість замовлень, що виконуються за час $x_i \leq T_i$; m_2 – кількість прострочених замовлень, що виконуються за час $T_i < x_i \leq T x_i$; m_3 – кількість невиконаних замовлень, що виконуються за час $x_i > T x_i$; $F_{H,i}^j, F_{T,i}^j, F_{L,i}^j$ – додаткові витрати підприємства при j –тому порядку виконання замовлень відповідно: від наявності незавершеного виробництва, від прострочування терміну виконання замовлення та від втрати замовлення (відмови у виконанні); F_Q^j – додаткові витрати, обумовлені зупинками для переналаштування обладнання.

Послідовність виконання замовлень s_j , що є параметром оптимізації в задачі (2.3), визначає всі види витрат, адже від неї залежить як входження замовлення до числа тих, що виконуються наперед, тих, що виконуються із запізненням та тих, що відкидаються, так і час x_i завершення виконання i –того

замовлення, не кажучи вже про сукупний час, витрачений на переналаштування $\sum_{i=1}^{m_1+m_2-1}(q_{i,i+1})$. Тому надалі записуємо формули, опускаючи індекс j , і розуміючи, що всі види витрат розраховуються при поточній послідовності s_j .

Додаткові витрати підприємства від наявності незавершеного виробництва оцінюються для кожного замовлення за формулою

$$F_{H,i} = \max\{0; \alpha \cdot w_i(c_i - p_i)(T_i - x_i)\}, \quad (2.6)$$

де x_i – час, за який планується закінчити виконання i –того замовлення; T_i – час, через який клієнт планує отримати й сплатити i –те замовлення; c_i – відпускна ціна тонни продукції по i –тому замовленню, грн./тонну; p_i – собівартість тонни продукції о i –тому замовленню, грн./тонну; w_i – обсяг i –того замовлення, тонн; $\alpha > 0$ – коефіцієнт дисконтування оборотних коштів, в.о./добу.

Слід відзначити, що величина ціни за тонну одиниці продукції для кожного із замовлень встановлюється відділом маркетингу в залежності від зовнішніх факторів та особливостей замовлення, і для однієї й тієї самої продукції може відрізнятися на 20–30%. Ключовими факторами є додаткові вимоги покупця до терміновості виконання, пакування, мірності, маркування, сертифікації, виготовлення малого обсягу продукції тощо (підвищують собівартість, і як наслідок, ціну), а також припустимість немірної довжини, замовлення труб без термообробки, зовнішнього покриття, додаткової обробки кінців тощо (зменшує собівартість і, відповідно, ціну).

З огляду на це, раціональним було б дотримуватися фіксованої величини норми прибутку для кожного виду продукції $\forall g \in G: (c - p)_j = \text{const}$, але така жорстка умова може призводити до перевищення ціни над ринковою і, як наслідок, втрати замовлення.

Додаткові витрати підприємства від перевищення терміну виконання замовлення оцінюються за формулою

$$F_{T,i} = \max\{0; Dx_i \cdot w_i \cdot c_i(x_i - T_i)\} | x_i \leq Tx_i, \quad (2.7)$$

де Dx_i – відносна до ціни продукції величина штрафу за кожен день перевищення директивного терміну виконання i –того замовлення, в.о./добу; Tx_i – крайній час, через який i –те замовлення втрачається. Решта позначень – аналогічні (2.6).

Слід відзначити, що навіть якщо клієнт згоден чекати достатньо довго, але існує щоденний штраф, межа Tx_i може бути розраховано автоматично з виконання умови $Dx_i \cdot w_i \cdot c_i(Tx_i - T_i) = w_i \cdot (c_i - p_i)$. Праворуч в даному рівнянні стоїть штраф за перевищення терміну виконання замовлення, ліворуч – очікуваний прибуток від виконання замовлення. Інакше кажучи, при відомому Dx_i , замовлення слід включати до виробничого плану (2.4), якщо

$$Tx_i \leq T_i + \left[\frac{1 - \frac{p_i}{c_i}}{Dx_i} \right]. \quad (2.8)$$

Додаткові витрати підприємства від втрати замовлення при неможливості його виконати у відведений термін оцінюються за формулою

$$F_{L,i} = w_i(c_i - p_i)|x_i > Tx_i. \quad (2.9)$$

Фактично під цим видом втрат слід розуміти той прибуток, який міг би бути отриманий від замовлення, але не буде отриманий через те, що замовлення не увійшло до плану.

Нарешті, додаткові втрати металургійного підприємства, що обумовлені витратами часу на переналаштування обладнання на новий вид продукції, пропонується розраховувати за формулою

$$F_Q = \sum_{i=1}^{m_1+m_2-1} q_{i,i+1} \frac{w_i(c_i - p_i) + w_{i+1}(c_{i+1} - p_{i+1})}{x_i + x_{i+1}}, \quad (2.10)$$

де $q_{i,i+1}$ – час переналаштування.

Запис (2.10) пов'язує час, який проходить у неробочому режимі між виконанням замовлень i та $i + 1$ з середнім очікуваним прибутком від виконання двох цих замовлень. Аби компенсувати час у чисельнику, отриману величину відносять до середньої тривалості виконання замовлень i та $i + 1$.

Подібні моделі знайшли широке застосування у сучасних моделях керування підприємством, зокрема MRP II (Manufacturing Resource Planning), ERP (Enterprise Resource Planning) та APS (Advanced Planning and Scheduling System) [218], які передбачають вирішення багатокритеріальної задачі керування послідовностями виконання замовлень. При цьому, критеріями оптимізації розкладу можуть бути один або декілька з наступних:

- максимальна частка замовлень, виконаних у відповідності до встановлених термінів $x_i = T_i$ (виконання «точно в термін»);
- мінімальне середнє запізнення виконання всього переліку робіт;
- мінімальний обсяг незавершеного виробництва упродовж всього періоду планування (так звана «робота без внутрішнього складу»);
- мінімальний час неробочого стану обладнання;
- мінімізація кількості замовлень, які не прийняті до виконання.

Задача, що описується рівняннями (2.2)–(2.10), передбачає одночасне зважене за сукупним матеріальним показником виконання більшості згаданих критеріїв. Альтернативами, які будуть оцінюватись за зведеним критерієм мінімуму сукупних додаткових втрат від виробничої діяльності (2.5), будуть послідовності обслуговування замовлень s_j .

При цьому, задача, що традиційно [40] належить до класу комбінаторних оптимізаційних задач теорії розкладів, має ознаки іншої відомої комбінаторної задачі – побудови маршруту руху комівояжера (Travelling salesman problem, TSP) [69], а саме – її незамкненого варіанту.

Оскільки час переналаштування з одного виду продукції на інший в більшості випадків обумовлений роботою автоматизованих технічних систем, матриця Q , що містить витрати часу на переналаштування буде симетричною. Водночас для матриці Q виконується умова трикутника $q_{ab} \leq q_{ac} + q_{cb}$, що є ознакою метричності розв'язуваної задачі.

В якості метрики пропонується застосовувати так звану максимальну метрику [64], яка враховує лише найбільшу відстань по координатах. Останніми в даному випадку виступають окремі ділянки технологічного процесу. Вибір

метрики обумовлений тим, що переналаштування обладнання на різних ділянках може виконуватись персоналом одночасно, при цьому лімітуватиме завжди лише одна ділянка – з найбільшим часом переналаштування.

При розгляді поставленої задачі як задачі комівояжера слід враховувати ще одну особливість, обумовлену технологічним процесом, що моделюється: одночасно від різних замовників можуть надходити (чи принаймні розглядатися при вирішенні задачі планування) замовлення на ідентичний вид продукції з однаковими умовами її виготовлення. Подібні замовлення характерні для прокатних виробництв, спеціалізація яких включає продукцію, що використовується у будівництві (швелер, кутовий профіль, балка тощо) й виготовляється з найпростіших марок вуглецевої сталі.

В цьому випадку метрична відстань між подібними замовленнями буде дорівнювати нулю, що не властиво для класичної постановки задачі [64]. Аби не порушувати математичну цілісність (кожне замовлення має бути відокремлене й не зливатися із замовленням іншого клієнта), пропонується замість нульового часу переналаштування використовувати наперед відому малу величину $q_{i,j}^0 = 0,01 \cdot \min\{q_{i,j}\}$.

В подальших розділах описане розв'язання задачі планування замовлень для різних прокатних виробництв, зокрема трубного та сортового прокату, з використання запропонованого алгоритму цілочисельної оптимізації.

2.2 Математична модель оптимізації ваги зливку з огляду на перебіг технологічного процесу на наступних переділах

Як було показано на рис. 1.2, послідовність технологічних операцій при виробництві сортового прокату за [6] та безшовних труб за [5] містять ряд операцій, що у загальному випадку можуть звестися до послідовності:

- формування із рідкого металу зливків;
- охолодження та нагрівання зливків;

- поділ зливка на передільні заготовки;
- прокатування передільних заготовок та поділ їх на штанги готової продукції.

В двох останніх операціях можливе утворення обрізків, яке є вкрай небажаним з точки зору витратного коефіцієнту металу. Всі обрізки, які утворюються в ході цих операцій вважають втратами, адже у виплавлений метал вже вкладена лєвова частка собівартості. Відтак утворення обрізків вкрай небажане, як і виготовлення так званої немірної продукції.

Розмір передільних заготовок для кожного виду готової продукції l_m залежить від мірності штанг p , на які буде розкроюватись готова продукція, та печі, в якій заготовки розігривають перед прокаткою. Наприклад, якщо фасонний прокат або труба відвантажується залізничним транспортом в стандартних вагонах, вона розкроюється на довжину 12 або 11,7 метрів. В разі транспортування автомобільним транспортом може використовуватись розкроювання на 9 або 6 метрів. Надалі приймаємо ці чотири розміри як можливі значення параметру $p = 1,2,3,4$.

Аби виготовити з кожної заготовки цілу кількість мірної готової продукції x_m , заготовки повинні мати певну оптимальну довжину l_m , яка передбачатиме з урахуванням закону збереження маси металу мінімальну кількість обрізків $L_n - \sum l_m x_m$ розкроюванні зливка з номером n . Для передільної заготовки існує зазвичай верхня і нижня межа довжини, яка визначається конструкцією нагрівальної печі та прокатного агрегату. Відповідно для зливка, на які ділиться поточна порція металу в ковші, існують верхня та нижня межі ваги $q_{min} \leq q \leq q_{max}$.

Отже, потрібно розробити математичну модель поділу плавки Q на зливки $q_n, n = 1, \dots, N$ з метою мінімізації витратного коефіцієнту металу за рахунок зменшення кількості немірної продукції $F(q, x) \rightarrow \min$ шляхом врахування розкроювання заготовок у двох переділах.

Умовою паралельного виконання кількох замовлень або переходу з виконання одного замовлення до іншого, крім однакової марки сталі, є однаковість поперечного переділу (типу) бльома, у який розкатується злиток.

Таблиця 2.1 – Використання заготовок при виготовленні фасонного прокату (швелерів) на ПАТ «ДМЗ»

| Профіль | Стандарт | Висота полиці, мм | Маса 1м за ТУ кг | Перетин заготовки, мм | Довжина заготовки, м | Довжина бльома, м | Довжина штанги, м | Кількість штанг, шт | Обрізки, | |
|-------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------|--------------|
| | | | | | | | | | м | % |
| Швелер №8П | ТУ У-14-2-1185-97 | 40 | 7,034 | 125*125 | 2,40 | 39,8 | 12,0 | 3 | 3,78 | 9,51% |
| | | 40 | 7,034 | 125*125 | 2,90 | 48,1 | 12,0 | 4 | 0,07 | 0,15% |
| | | 40 | 7,034 | 125*125 | 3,20 | 53,0 | 12,0 | 4 | 5,04 | 9,51% |
| Швелер №10П | ТУ У-14-2-1185-97 | 46 | 8,580 | 150*150 | 2,40 | 47,0 | 12,0 | 3 | 10,96 | 23,35% |
| | | 46 | 8,580 | 150*150 | 3,10 | 60,7 | 12,0 | 5 | 0,66 | 1,09% |
| | | 46 | 8,580 | 150*150 | 3,20 | 62,6 | 12,0 | 5 | 2,62 | 4,18% |
| Швелер №12П | ТУ У-14-2-1185-97 | 52 | 10,216 | 150*150 | 2,40 | 39,4 | 12,0 | 3 | 3,44 | 8,73% |
| | | 52 | 10,216 | 150*150 | 2,95 | 48,5 | 12,0 | 4 | 0,48 | 1,00% |
| | | 52 | 10,216 | 150*150 | 3,20 | 52,6 | 12,0 | 4 | 4,59 | 8,73% |
| Швелер №14П | ТУ У-14-2-1185-97 | 58 | 12,066 | 150*150 | 2,40 | 33,4 | 12,0 | 2 | 9,40 | 28,14% |
| | | 58 | 12,066 | 150*150 | 2,60 | 36,2 | 12,0 | 3 | 0,18 | 0,50% |
| | | 58 | 12,066 | 150*150 | 3,20 | 44,5 | 12,0 | 3 | 8,53 | 19,15% |
| Швелер №16П | ТУ У-14-2-1185-97 | 64 | 13,825 | 150*150 | 2,40 | 29,1 | 12,0 | 2 | 5,14 | 17,63% |
| | | 64 | 13,825 | 150*150 | 3,00 | 36,4 | 12,0 | 3 | 0,42 | 1,16% |
| | | 64 | 13,825 | 150*150 | 3,20 | 38,9 | 12,0 | 3 | 2,86 | 7,37% |
| Швелер №18П | ТУ У-14-2-1185-97 | 70 | 16,164 | 170*170 | 2,40 | 32,0 | 12,0 | 2 | 8,02 | 25,05% |
| | | 70 | 16,164 | 170*170 | 2,75 | 36,7 | 12,0 | 3 | 0,69 | 1,88% |
| | | 70 | 16,164 | 170*170 | 3,20 | 42,7 | 12,0 | 3 | 6,69 | 15,68% |
| Швелер №20 | ТУ У-14-2-1185-97 | 78 | 18,414 | 170*170 | 2,40 | 28,0 | 12,0 | 2 | 3,98 | 14,22% |
| | | 78 | 18,414 | 170*170 | 3,15 | 36,7 | 12,0 | 3 | 0,72 | 1,96% |
| | | 78 | 18,414 | 170*170 | 3,20 | 37,3 | 12,0 | 3 | 1,30 | 3,49% |
| Швелер №22П | ТУ У-14-2-1185-97 | 82 | 20,527 | 135*280 | 2,40 | 33,0 | 12,0 | 2 | 9,02 | 27,32% |
| | | 82 | 20,527 | 135*280 | 2,65 | 36,5 | 12,0 | 3 | 0,46 | 1,27% |
| | | 82 | 20,527 | 135*280 | 3,20 | 44,0 | 12,0 | 3 | 8,03 | 18,24% |
| Швелер №24П | ТУ У-14-2-1185-97 | 90 | 23,698 | 135*280 | 2,40 | 28,4 | 12,0 | 2 | 4,44 | 15,62% |
| | | 90 | 23,698 | 135*280 | 3,05 | 36,3 | 12,0 | 3 | 0,30 | 0,84% |
| | | 90 | 23,698 | 135*280 | 3,20 | 38,1 | 12,0 | 3 | 2,09 | 5,48% |
| Швелер №30П | ТУ У-14-2-1185-97 | 100 | 32,090 | 135*280 | 2,40 | 21,1 | 12,0 | 1 | 9,10 | 43,12% |
| | | 100 | 32,090 | 135*280 | 2,75 | 24,2 | 12,0 | 2 | 0,17 | 0,71% |
| | | 100 | 32,090 | 135*280 | 3,20 | 28,1 | 12,0 | 2 | 4,13 | 14,68% |

Зокрема, в табл. 2.1 наведено перетини прямокутної передільної заготовки, що використовується у виробництві швелерів різних марок ПАТ “ДМЗ” (м. Дніпро). Як бачимо, наприклад, швелер №10П можна отримати з того з злитка, що і швелери №12П, №14П та №16П, адже передільна заготовка для всіх цих профілів має перетин 150×150 мм. При широкому сортаменті прокатної продукції з одного типу передільних заготовок можуть виготовлятися до десяти видів готової продукції.

Для побудови математичної моделі мінімізації витрат металу в двоетапному виробництві уточнимо спочатку деякі деталі технології виробництва, а також зробимо декілька припущень щодо вихідних даних, що обумовлені технологічним процесом на базовому підприємстві ПАТ «ДМЗ».

Отже, рідкий метал виробляють порціями по Q тонн (на базовому підприємстві $Q = 60 \pm 2$ т). Маса металу в ковші після плавки вимірюється крановими вагами з похибкою не більше 30 кг.

Виплавлений метал розливають у виливниці (їх стандартна кількість $N = 8$ – стільки розміщується на одній залізничній платформі), кожна з яких $n = 1, \dots, N$ може прийняти масу металу q_n , що лежить в межах від $q_{min} = 4400$ до $q_{max} = 7400$ кг рідкого металу. При цьому в ковші повинен залишатися метал в кількості близько 400 кг (осадові речовини), який буде використаний в наступній плавці. Даний виробничий етап породжує перші обмеження нашої моделі:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_N \leq Q, \quad (2.11)$$

$$q_{min} \leq q \leq q_{max}, \quad n = \overline{1, N} . \quad (2.12)$$

Далі, згідно схеми на рис. 1.2 а), метал виливається у блюми певних перерізів, розкатується і розрізається. Для позначення варіанту блюму, який буде використаний для виконання поточного замовлення вводимо індекс i , який приймає значення $i = 1, 2, \dots, I$, де I – загальна кількість варіантів блюмів, що використовуються у виробництві. Перетин блюма $a_i \times c_i$ встановлюється відповідно до виду продукції, що виготовляється. Зв'язок між номером блюму і його перетином ілюструє табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Варіанти блюмів та їх перетини

| Номер варіанту | Поперечний переріз |
|----------------|--------------------|
| 1 | 125x125 |
| 2 | 135x280 |
| 3 | 150x150 |
| ... | ... |
| i | $a_i \times c_i$ |
| ... | ... |
| I | 230x100 |

Для кожного виду продукції m з номенклатури M ($m = 1, 2, \dots, M$) існує певний рядок в табл. 2.2, який визначає прив'язку цього виду продукції до певного варіанту блюму. Як видно з табл. 2.1, деякі варіанти блюмів передбачають виготовлення не одного виду готового виробу, а відразу кілька (до 5). Це дозволяє, комбінуючи довжини передільних заготовок в різній кількості, максимально використовувати всю довжину отриманого блюма (всю масу налитого злитка).

Розкроювання злитка для виготовлення заданої кількості готової продукції (відповідно до замовлення) здійснюється в два етапи. На першому етапі весь злиток поділяється на передільні заготівки, довжина яких може лежати в межах від 2,4м до 3,2м з кроком 0,05м. На другому – кожна передільна заготовка розкатується в готовий виріб (швелер, кут, балка, труба і т.д.) і ділиться на мірні штанги заданої довжини відповідно до замовлення (визначається логістичними вимогами клієнта). Номер виду розкроювання надалі позначаємо індексом p , який приймає значення $p = \{1, 2, 3, 4\}$, що означає розкроювання готової продукції відповідно на 12м, 11,7м, 9м або 6м.

При побудові моделі будемо вважати, що:

1) можна заздалегідь оцінити кількість блюмів певного перерізу w_i , яку необхідно використати для виготовлення продукції за планом b_m з розкроюванням p ;

2) між виливницями і блюмами встановлена однозначна відповідність, тобто відомо, з якої виливниці метал розкатується у блюм заданого перерізу;

3) кожна передільна заготівка розкроюється на штанги тільки одного розміру (частина готових виробів довжиною по 12м, а частина, наприклад, по 9м не допускається);

4) для кожного виду готової продукції і відповідно кожного варіанту блюму наперед розраховується оптимальна довжина передільної заготовки L_m , що залежить від підсумкового розкроювання p . В табл. 2.1 жирним для кожного виду продукції виділено рядок, що відповідає оптимальній довжині передільної заготовки в заданих межах $2,4\text{м} \leq L_m \leq 3,2\text{м}$. Зазвичай така довжина передільної заготовки одна, але для деяких видів готової продукції їх може бути й декілька, відповідно кратності штанг готової продукції, на яку ця заготовка буде поділена в майбутньому (максимум три). При цьому фінальне розкроювання p має ключове значення для розкроювання передільної заготовки.

Таблиця 2.3 – Оптимальна довжина передільної заготовки швелера №8П залежно від довжини штанг

| Технологічний параметр | Варіанти розкроювання | | | |
|---------------------------------|------------------------------|-------|-------|-------|
| Довжина готової продукції, м | 11,7 | 12 | 9 | 6 |
| Маса 1 м погонного за ТУ, кг | 7,034 | 7,034 | 7,034 | 7,034 |
| Оптимальна довжина заготовки, м | 2,85 | 2,9 | 2,75 | 2,9 |
| Довжина розкату, м | 47,2 | 48,1 | 45,6 | 48,1 |
| Кількість штанг, шт. | 4 | 4 | 5 | 8 |
| Залишки, м | 0,44 | 0,07 | 0,58 | 0,07 |
| Залишки, % | 0,94% | 0,15% | 1,28% | 0,15% |

В табл. 2.3 наведені оптимальні довжини передільної заготівки, яка забезпечує мінімальний залишок розкату після отримання з нього максимальної кількості штанг певної довжини для швелера №8П стандарту ТУ У-14-2-1185-97

(висота полиці 40мм, маса 1м готового виробу – 7,034 кг, виготовляється з заготовки перетином 125*125 мм).

Запропонуємо математичну модель задачі оптимізації плану виробництва продукції з урахуванням всіх технологічних процесів. При цьому на відміну від відомих підходів сформулюємо задачу розподілу наявного металу між виливницями таким чином, щоб розкроювання отриманих з них злитків на передільні заготівки забезпечувало мінімальну кількість обрізків на цьому та наступному етапах прокатки фасонних профілів. Іншими словами, потрібно мінімізувати кількість металу, з якого виготовляється продукція за замовленням, за умови мінімуму обрізків на наступних операціях.

Для побудови математичної моделі задачі оптимального виробництва продукції надалі вважаємо, що замовлення надходить у прокатний цех у вигляді плану виробництва b , таблиці, в якій рядок $m = 1, 2, \dots, M$ відповідає виду продукції, а стовпець $p = 1, 2, 3, 4$ – варіанту її розкроювання. Для кожного сполучення m і p наперед відомі відповідні значення:

- L_m^p – оптимальна довжина передільної заготівки для виробництва відповідної продукції (див. табл. 2.1);

- A_m^p – кількість штанг відповідної продукції, отримана після розкрою однієї заготівки довжини L_m^p ;

- R_m^p – мінімальний залишок злитку після його розкрою для виготовлення відповідної продукції.

Таблиця 2.4 містить зв'язок між видами продукції, варіантами її розкроювання та наперед відомими параметрами переділу заготовки на етапі розкроювання готової продукції. Фактично таблиця 2.4 є розгорнутим записом табл. 2.1 для всіх варіантів розкроювання всіх найменувань готової продукції.

Таблиця 2.4 – Зв’язок замовлення і оптимальних параметрів передільної заготовки.

| Індекси m, p | Профіль | Довжина штанги | План випуску (штанг) | Оптимал- ьний розмір заготовки, м | Кількість штанг після прокатки, шт. | Залишки після розкרוу- вання заготовки, м |
|-------------------|-------------|-------------------|----------------------------|---|---|--|
| 1,1 | Швелер №8П | 12 | b_1^1 | 2,9 | 4 | 0,07 |
| 1,2 | -- | 11,7 | b_1^2 | 2,85 | 4 | 0,44 |
| 1,3 | -- | 9 | b_1^3 | 2,75 | 5 | 0,58 |
| 1,4 | -- | 6 | b_1^4 | ... | | |
| 2,1 | Швелер №10П | 12 | b_2^1 | | | |
| 2,2 | -- | 11,7 | b_2^2 | | | |
| 2,3 | -- | 9 | b_2^3 | | | |
| 2,4 | -- | 6 | b_2^4 | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| m, p | вид № ... | l_p | b_m^p | L_m^p | A_m^p | R_m^p |
| ... | | | ... | ... | ... | ... |
| $M, 4$ | вид №... | | b_M^p | | | |

Кількість заготовок оптимальної у відповідності до табл. 2.4 довжини, яку необхідно отримати з блюму для виконання поточного замовлення обчислюється наступним чином:

$$Z_m^p = b_m^p / A_m^p, \quad m = \overline{1, M}. \quad (2.13)$$

Як вже наголошувалось раніше, кожна продукція має виготовлятися з певного виду блюму з певним перетином. Аби встановити однозначний зв’язок між видами блюмів та номенклатурою продукції, що виготовляється, пропонується застосовувати двійкову матрицю H , яка складається з I рядків (за кількістю можливих варіантів блюмів) та M стовпців (за кількістю можливих видів продукції). Кожен елемент h_{im} дорівнює «1», якщо з i – того блюму можна отримати продукцію m –того типу, та «0» у протилежному випадку.

Загальний вигляд матриці H ілюструє табл. 2.5. Неважко помітити, що кожен стовпець даної матриці містить лише одну «1», решта «0». Водночас, оскільки з блюмів одного перетину може бути виготовлено кілька видів готової продукції, в кожному рядку може бути кілька одиниць (до десятка).

Як наголошувалось раніше, в роботі розглядається спрощена модель задачі, в якій вважається, що для виготовлення поточного замовлення достатньо однієї плавки металу.

Таблиця 2.5 – Зв'язок між блюмами та продукцією

| Варіант блюму | Вид продукції | | | | | | | |
|---------------|---------------|---|---|-----|-----------------------|-----|--------------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | ... | <i>m</i> | ... | <i>M - 1</i> | <i>M</i> |
| 1 | 1 | 0 | 0 | ... | 0 | ... | | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | ... | 1 | 1 |
| 3 | | | 1 | ... | | | 0 | 0 |
| ... | | | | ... | | ... | | |
| <i>i</i> | | | | ... | <i>h_{im}</i> | ... | | |
| ... | | | | ... | | ... | | |
| <i>I</i> | | | | ... | | ... | | |

Тоді, для розв'язності задачі має бути виконана наступна умова:

$$\sum_{p=1}^4 \sum_{m=1}^M g_m^p b_m^b \leq Q \quad (2.14)$$

де g_m^p – маса 1 штанги відповідної продукції, що обчислюється як маса 1 погонного метру продукції, помножена на довжину штанг L_m^p .

Оцінимо тепер, враховуючи викладене, а також обмеження (2.12), скільки блюмів і якого перерізу потрібно використовувати для виконання замовлення:

$$\frac{1}{q_{max}} \sum_{p=1}^4 \sum_{m=1}^M g_m^p (b_m^b \cdot h_{im}) \leq w_i \leq \frac{1}{q_{min}} \sum_{p=1}^4 \sum_{m=1}^M g_m^p (b_m^b \cdot h_{im}), i = \overline{1, I} \quad (2.15)$$

Тут q_{max} і q_{min} – максимальна і мінімальна вага блюму згідно з технологічними обмеженнями. Оскільки кількість виливниць пов'язана з кількістю використовуваних блюмів, то сума блюмів, які будуть розлиті з поточного ковша та підуть на виконання поточного замовлення, має дорівнювати

$$\sum_{i=1}^I w_i = N. \quad (2.16)$$

Враховуючи (2.15), (2.16) та той факт, що кожен зливоч при прокатуванні стає певним видом блюму, введемо двійкову матрицю D , розмірності $I \times N$, яка

однозначно пов'язує номер перерізу блюму і номер злитку. Кожен елемент d_{in} дорівнює «1», якщо з n -тої виливниці виготовлятиметься блюм i -того типу, та «0» у протилежному випадку.

Довжина блюму з n -тої виливниці після прокатки обчислюється за формулою:

$$l_n = \frac{q_n}{\bar{a}_n \bar{c}_n \rho}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (2.17)$$

де ρ – густина металу (кг/м^3), залежить від марки сталі, для найпоширенішої сталі 5пс $\rho = 7856 \text{ кг/м}^3$; \bar{a}_n, \bar{c}_n – розміри перерізу блюму, формально їх можна обчислити так:

$$\bar{a}_n = \sum_{i=1}^I d_{in} a_i; \quad \bar{c}_n = \sum_{i=1}^I d_{in} c_i; \quad n = \overline{1, N}. \quad (2.18)$$

Позначимо через x_m^{pn} – кількість заготовок довжини L_m^p , яку отримаємо після розкрою n -того блюму. Число (кількість) цих змінних значно менше за кількість можливих сполучень $4 \times N \times M$, і визначається наступним чином: якщо величина

$$\sigma_{mn} = \sum_{i=1}^I h_{im} d_{in} \quad (2.19)$$

$\sigma_{mn} = \sum_{i=1}^I h_{im} d_{in}$ дорівнює «1», то їй відповідають чотири змінні, що можуть приймати лише цілі невід'ємні значення. Коли $\sigma_{mn} \neq 1$, змінної x_m^{pn} не існує.

Враховуючи викладки (2.13) – (2.19) та допоміжні змінні, введені нами вище, математична модель задачі мінімізації кількості металу, що використовується для виготовлення поточного замовлення, яке не перевищує обсяг поточної плавки (2.11), може бути записана наступним чином: потрібно знайти такі значення величин q_n та x_m^{pn} при можливих коефіцієнтах $n = 1, 2, \dots, N$; $m = 1, 2, \dots, M$ та $p = \{1, 2, 3, 4\}$, за яких функція

$$F(q, x) = \sum_{n=1}^N \left(l_n - \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^4 (L_m^p \cdot x_m^{p,n}) \mid \sigma_{mn} = 1 \right) \rightarrow \min \quad (2.20)$$

приймає мінімальне значення і виконуються обмеження (2.11), а також наступні умови:

$$\sum_{n=1}^N x_m^{p,n} \geq Z_m^p, \quad m = \overline{1, M}, \quad p = \overline{1, 4} \quad (2.21)$$

$$\frac{q_n}{\bar{a}_n \bar{c}_n \rho} - \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^4 (L_m^p \cdot x_m^{p,n}) \mid \sigma_{mn} = 1 \geq 0, \quad n = \overline{1, N} \quad (2.22)$$

$$x_m^{p,n} \geq 0, \quad x_m^{p,n} - \text{цілі}, \quad m = \overline{1, M}; \quad n = \overline{1, N}; \quad \sigma_{nm} = 1 \quad (2.23)$$

Сформульована задача передбачає економію матеріальних ресурсів за рахунок мінімізації витраченого на виготовлення замовлення металу та часу виконання замовлень за рахунок зменшення кількості переналаштувань механізму розкроювання при виробництві запланованої кількості продукції. Аналогічна модель, з урахуванням певних технологічних припущень і умов, може бути побудована для будь-якого іншого прокатного виробництва, що передбачає два переділи початкових зливків. Викладений підхід може бути застосований для оптимізації виробництва труб, коліс, фасонного прокату та іншої прокатної продукції [186].

Побудована математична модель є задачею частково цілочисельного лінійного програмування. Для її розв'язування можна застосувати або методи відсікань Гоморі, або комбінаторні методи, наприклад, метод гілок та меж, або ж евристичні алгоритми.

Запропонована математична модель оптимальної розливки рідкої сталі на зливки була застосована для виконання поточних замовлень була застосована на прикладах виконання типових добових замовлень в умовах роботи металургійних підприємств Придніпровського регіону. Результати застосування математичної моделі та оцінка точності й стійкості розв'язків, що забезпечує

розроблена модель при вирішенні оптимізаційних задач для реальних замовлень, наведені в подальших розділах.

2.3 Математична модель оптимального розкроювання заготовок прокатного виробництва

Викладені в попередньому розділі підходи застосовуються при виконанні замовлень на прокатну продукцію в припущенні, що виготовлена рідка сталь розливається на зливки, а ті розкатуються у прямокутну заготовку без браку та непередбачуваних технологічних проблем. В реальності, головною мірою в силу впливу людського фактору, статистично частими є ситуації, коли між розливкою сталі на зливки заданої ваги та отриманням прямокутної заготовки стаються технологічні порушення. До таких слід віднести [19]:

- 1) наднормовий угар зливка в нагрівальній печі через підвищену температуру нагрівання чи перевищення часу нагрівання;
- 2) додатковий обріз парогідравлічному ножі (ПГН), який може варіюватися в залежності від якості кінців заготовки, зокрема наявності тріщин і неметалевих включень на кінцях зливку;
- 3) додатковий обріз пилами гарячого різання (ПГР) переднього й заднього кінців (за необхідності) квадратної чи прямокутної заготовки до повного виконання профілю.

Всі ці фактори призводять до того, що маса розкату може відрізнятись від розрахункової, вирахованої з ваги зливка за методикою, описаною вище. У таких випадках, оператор пилок гарячого різання має оперативно змінити план розкроювання, виходячи з наявної довжини розкату.

Як було зазначено в першому розділі, зазвичай задача оптимального розкроювання відносить до класу задач цілочисельного програмування. В загальному випадку, вона формулюється наступним чином.

Необхідно із заготовок з довжинами $L_1, L_2, \dots, L_j, \dots, L_m$, що надходять, викроїти штанги довжиною $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n$ в заданій кількості p_i , де $i = 1, 2, \dots, n$. Показником, що визначає економічність розкроювання, як і всього прокатного виробництва, є витратний коефіцієнт металу (ВКМ), який розраховується за формулою

$$K_{\text{ВКМ}} = \frac{\sum_{j=1}^m L_j}{\sum_{i=1}^n p_i l_i}. \quad (2.24)$$

Одним з варіантів цільової функції при розкроюванні, таким чином, є мінімізація ВКМ [19]

$$K_{\text{ВКМ}} \rightarrow \min. \quad (2.25)$$

Інший варіант – мінімізація кількості використаних заготовок [219] за умови обмеження ВКМ

$$m \rightarrow \min, \quad (2.26)$$

$$K_{\text{ВКМ}} \leq K^*.$$

Як показує подальший аналіз, обидві цільові функції мають однаковий сенс, втім, їх використання іноді призводить до різних результатів.

Окрім мінімізації витрат матеріалу на виготовлення необхідної готової продукції план розкроювання повинен задовольняти ряду технологічних вимог, перелічених у попередньому розділі. Кожна зі згаданих умов може бути введена в постановку задачі у вигляді окремої цільової функції з пріоритетом меншим, ніж у мінімізації витрат металу, або ж у вигляді обмежень. Пропонується включати їх у загальну цільову функцію у вигляді штрафних функцій за порушення умови.

З огляду на викладені вище умови та обмеження, використовуючи (2.24) та (3.25) математична модель задачі набуває вигляду

$$\sum_{j=1}^m L_j / \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_i x_{ij} + \alpha \sum_{j=1}^m k_j + \beta \sum_{i=1}^n w_i \rightarrow \min \quad (2.27)$$

за умов і обмежень:

$$\sum_j^m x_{ij} \geq p_i; \quad (2.28)$$

$$x_{ij} \geq 0$$

де x_{ij} - кількість штанг i –того типу довжиною l_i , що розкроюються з j –тої заготовки; L_j - довжина j –тої заготовки; p_i - загальна потреба у штангах i –того типу, необхідна згідно із замовленням; $k_j = \text{count}_i(x_{ij} > 0)$ - кількість типів штанг, що виготовляється із j –тої заготовки; $w_i = \text{count}_j(x_{ij} > 0)$ - кількість заготовок, що використані для виготовлення штанг i –того типу; α та β - вагові коефіцієнти для штрафних функцій технологічних обмежень.

Як видно з (2.27), ключовою цільовою функцією є мінімізація ВКМ, додатковими (вторинними) – штрафні функції додаткових технологічних обмежень. Вагові коефіцієнти останніх можуть варіюватися в широких межах: нульове значення відповідатиме нехтуванню додатковими умовами, а значення близьке до 1/3 чи більше ставитиме ці умови в один порядок з критерієм мінімуму витратного коефіцієнту.

Найбільш повний аналіз методів одновимірного розкроювання з різноманітними підходами до побудови початкового наближення та процедурами подальшого вдосконалення плану розкрою викладений у [63]. Автори відзначають, що постановка задачі (2.27)-(2.28) не містить у явному вигляді тої величини, на яку має бути спрямована оптимізація, а саме – кількість залишків (обрізків), що залишається після розкроювання.

Використовуючи попередні позначення, переформулюємо задачу наступним чином:

$$\sum_{j=1}^m \left(L_j - \sum_{i=1}^n l_i x_{ij} \right) \rightarrow \min \quad (2.29)$$

вважаючи справедливим (2.28).

Додаткові цільові функції з (2.27) вже не грають визначної ролі, адже з точки зору мінімізації собівартості продукції й загального ходу технологічного циклу відсутність обрізків має набагато більше значення.

Цільова функція (2.29) забезпечує ефективний результат тим краще, чим більше число n замовлень, що виконуються паралельно (типів штанг що можуть виготовлятися з поточної заготовки). Втім, за відсутності глобального контролю за виконанням замовлень [17, 184] виникає небезпека нерівномірності виконання плану. До цього призводить також і людський фактор – оператору простіше виготовляти однотипні штанги із заготовки, ніж комбінувати різні типи штанг.

З метою запобігання подібної ситуації пропонується введення додаткового критерію, який має регулювати рівномірність виконання замовлення [220]

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i}^n \left(\frac{x_{ij}}{z_i + 1} - \frac{x_{kj}}{z_k + 1} \right)^2 \rightarrow \min \quad (2.30)$$

де $x_{ij}(x_{kj})$ – кількість заготовок, що вирізаються на виконання i – ого (k – того) замовлення із заготовки j ; $z_i(z_k)$ - залишок об'єму замовлення p_i , яке ще не виконане на момент розкроювання j – тої заготовки, $z_i = p_i - \sum_{q=1}^{j-1} x_{iq}$; q – номери вже розкромлених на даний момент штанг.

У зв'язку з тим, що в ході виконання замовлення його обсяг поступово зменшується, для запобігання ділення на 0 до залишку замовлення додається 1.

Сенс критерію (2.30) полягає у зв'язуванні різних замовлень між собою – заготовки різної довжини мають викроюватися паралельно, максимально пропорційно залишку замовлення на них.

Аби доданий критерій не порушував загальної мети оптимізації, його необхідно нормувати та привести до (2.29). В результаті запропонована цільова функція оптимізації розкроювання лінійних заготовок на штанги наперед заданої довжини з мінімізацією сумарної кількості обрізків та рівномірним виконанням замовлень:

$$\sum_{j=1}^m \left(L_j - \sum_{i=1}^n l_i x_{ij} + \lambda \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i}^n \left(\frac{x_{ij}}{p_i - \sum_{q=1}^{j-1} x_{iq} + 1} - \frac{x_{kj}}{p_k - \sum_{q=1}^{j-1} x_{kq} + 1} \right)^2 \right) \rightarrow \min \quad (2.31)$$

де λ – ваговий коефіцієнт для допоміжного критерію (2.30). За логікою, він має розмірність довжини, але сама його величина є предметом окремого дослідження.

Постановка (2.31) з урахуванням (2.28) дозволяє вирішувати глобальну задачу мінімізації витратного коефіцієнта металу при послідовному прокатуванні заготовок заздалегідь невідомої довжини, застосовуючи принцип оптимальності Беллмана [64] при переході від одного частково-оптимального рішення до іншого.

Точне рішення поставленої задачі в умовах обмеження часу й суттєвої невизначеності вхідних даних не має сенсу. Отриманню наближених рішень присвячені ряд робіт зарубіжних вчених [61, 62], які пропонують ряд евристичних підходів й розглядають поставлену задачу дещо ширше за звичну постановку одновимірного пакування.

Цільові функції подібні до (2.31) запропоновані також в [221], де автори пов'язують також тип штанги, що вирізається із заготовки з її цінністю. Остання може бути еквівалентна як ціні, яку сплачує клієнт за тим чи іншим замовленням, так і терміновості цього замовлення. Втім, включення до цільової функції додаткових критеріїв, подібно до (2.27) або розв'язання задачі як багатокритеріальної з різною вагою критеріїв лише ускладнить задачу, не забезпечуючи значного підвищення ефективності рішень.

Однією з альтернатив ускладненню цільової функції, що дозволить суттєво підвищити ефективність отриманого рішення, може бути застосування замість лінійної багатофакторної моделі прогнозування довжини розкату нечіткої моделі на основі нейронної мережі, зокрема Сугено, або Такагі-Сугено-Канга [222]. В разі неможливості підвищити якість вимірювання величин, які визначають довжину розкату L_j , що входить до (2.24), (2.27) та (2.31), застосування нечітких оцінок цих величин дозволить більш точно й плавно прогнозувати

В цьому випадку для вирішення загальної проблеми оптимізації розкроювання металопродукції в процесі виробництва до комбінаторної задачі побудови часткових планів розкрою додається безперервна задача навчання нечіткої нейронної мережі [223]. Для розв'язання останньої можуть бути застосовані еволюційні методи оптимізації, один з яких запропонований автором у подальших розділах.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Техніко-економічний підхід до побудови планів виконання замовлень на прокатну продукцію враховує одночасне виконання критеріїв: максимальна частка замовлень, виконаних у відповідності до встановлених термінів, мінімальний обсяг незавершеного виробництва упродовж періоду планування, мінімальний час неробочого стану обладнання та мінімальна кількість замовлень, які не прийняті до виконання. Використання такого підходу дозволило розробити математичну модель побудови плану виконання замовлень на виготовлення прокату широкого сортаменту як незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці. Застосування такої моделі дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, ефективніші порівняно з традиційною методикою.

2. Перенесення прийняття рішення про оптимальний поділ металу для виготовлення певного замовлення на прокатну продукцію з операції розкроювання прокату на операцію розливки дозволило розробити математичну модель мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення замовлення, розмір якого не перевищує об'єм однієї плавки. Використання розробленої математичної моделі, що спирається на оптимальну довжину передільної заготовки для даного виду продукції та його кінцевого розкроювання, дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу при виконанні

конкретного замовлення та скоротити кількість переналаштувань різальних агрегатів.

3. Внаслідок випадкових порушень технологічного процесу або впливу людського фактору між розливкою сталі на зливки заданої ваги та отриманням прямокутної заготовки оптимальної довжини виникають технологічні відхилення. Для таких випадків розроблена математична оптимального розкроювання розкату довільної довжини, яка на відміну від відомих, припускає використання поточного зливку на передільні заготовки наступних замовлень. При цьому, на відміну від існуючих моделей розкроювання, цільова функція мінімізації включає додаткові складові, що відповідають за рівномірність виконання кількох замовлень на готову продукцію, якщо вони виконуються одночасно. Це дозволяє використовувати передільні заготовки різної довжини з одного виду блюму, тим самим мінімізуючи кількість обрізків та собівартість як поточного, так і наступних замовлень.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ В ПРОЦЕСАХ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ

Як зазначалося в розділі 1, важливою задачею підтримки прийняття управлінських рішень при керуванні виробничим процесом виготовлення прокатної продукції є оптимізація за зведеним економічним критерієм окремих операцій та побудова таких математичних моделей, які дозволяють виконувати згадану оптимізацію або прогнозувати певні параметри протікання процесу, які визначають кінцеву собівартість готової продукції.

В даному розділі розглянуто ряд моделей, що стосуються операцій, пов'язаних з виготовленням сталі. Кожна з них в свою чергу має суттєвий вплив на час та собівартість виконання всього комплексу робіт, необхідних для отримання готової продукції. Серед таких операцій розглянуті шихтування сталі, в тому числі розрахунок оптимальної кількості розкислювачів та сертифікація готової продукції. Також запропоновано модель прогнозування терміну роботи футеровки конвертера з метою визначення факторів, що сприятимуть його максимізації, і, відповідно, збільшенню відсотку робочого часу плавильних агрегатів.

3.1. Математична модель оптимізації шихти при конвертерному виробництві сталі

Основою розрахунку шихти, крім вимог до марки сталі, є так зване рівняння теплового балансу [224], що має вигляд

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{in} - \sum_{j=1}^m Q_j^{out} \rightarrow 0, \quad (3.1)$$

де $\sum_{i=1}^n Q_i^{in}$ – сума тепла, що надходить у конвертер від усіх джерел $i = 1 \dots n$;
 $\sum_{j=1}^m Q_j^{out}$ – сума тепла, що витрачається у $j = 1 \dots m$ процесі.

Традиційно [18, 92, 107, 224] розглядають п'ять основних джерел тепла у ванні конвертера:

$$\sum Q^{in} = Q_{\text{чав}} + Q_{\text{м.шлак}} + Q_{\text{дом}} + Q_{\text{зал}} + Q_{\text{шл-утв}}, \quad (3.2)$$

де $Q_{\text{чав}}$ – тепло від окислення чавуну, пропорційне його масі та початковій температурі; $Q_{\text{м.шлак}}$ – тепло від окислення міксерного шлаку, пропорційне температурі, масі чавуну та ступеню зашлакованості; $Q_{\text{дом}}$ – тепло від окислення неметалевих домішок шихти, нелінійно залежить від хімічних параметрів готової сталі, чавуну й охолоджувачів; $Q_{\text{зал}}$ – тепло від окислення заліза, що переходить в шлак і пил – нелінійно залежить від ступеня окислення та маси шлаку; $Q_{\text{шл-утв}}$ – тепло від шлакоутворення.

На практиці кількість шлаку в чавуні не перевищує 1%, тому теплотою, що вносить ця складова, можна знехтувати.

Водночас вся енергія, що утворюється в конвертері, витрачається на ступним чином:

$$\sum Q^{out} = Q_{\text{ст}} + Q_{\text{пил}} + Q_{\text{шл}} + Q_{\text{газ}} + Q_{\text{дис}} + Q_{\text{вкв}} + Q_{\text{втр}}, \quad (3.3)$$

де $Q_{\text{ст}}$ – тепло, що залишається готовій сталі, пропорційне її масі та температурі розливки; $Q_{\text{пил}}$ – тепло, що уноситься пилом, пропорційне середній температурі плавки та ступеню випаровування заліза; $Q_{\text{шл}}$ – тепло, що залишається в шлаку, пропорційне його масі та температурі розливки; $Q_{\text{газ}}$ – тепло, що виноситься з продуктами згоряння, пропорційне середній температурі плавки та сумі об'ємів газів, що відходять; $Q_{\text{дис}}$ – тепло дисоціації сполук заліза та вапна – нелінійна функція мас скрапу та ступенів забруднення; $Q_{\text{вкв}}$ – тепло, що уноситься з викидами металу, корольками металу в шлаку й виплесками – нелінійна функція початкового хімічного складу та ступеню забруднення скрапу; $Q_{\text{втр}}$ – тепло, що

передається фурмі, футеровці й корпусу конвертера – пропорційне сумі вхідного тепла.

Крім теплового балансу, в конвертері має підтримуватись матеріальний баланс [224]

$$\sum_{k=1}^p M_k^{in} - \sum_{l=1}^q M_l^{out} \rightarrow 0, \quad (3.4)$$

де $\sum_{k=1}^p M_k^{in}$ – сума мас усіх речовин $k = 1 \dots p$, що потрапляють до конвертера під час плавки; $\sum_{l=1}^q M_l^{out}$ – сума мас усіх речових $l = 1 \dots q$, що утворюються у процесі плавки.

В реальних процесах конвертерної плавки фіксованою величиною є вихід годного металу $M_{st}^{out} = const$, який має дорівнювати наперед заданій величині. Це обумовлено тим, що готова сталь розливається у виливниці заздалегідь відомими порціями. Міркування розподілу металу у виливниці розглянуто в у попередньому розділі та докладніше – в роботі [225]. Побудова оптимізаційної задачі розливу готової сталі розглянута у попередньому розділі.

Кількість решти речовин, що утворюються в процесі виготовлення сталі, потенційно не лімітується, визначаючись початковими умовами плавки та речовинами, що були витрачені. Складові матеріального балансу наведені у таблиці 3.1. Коефіцієнти a, b та c визначають відсотковий вміст відповідно шлаку, бруду та окалини.

Таблиця 3.1 – Складові матеріального балансу плавки

| Складові шихти | | Складові витрат матеріалів | |
|-----------------------|-----------------------|--|-----------|
| Чавун рідкий | $M_{чав}$ | Рідкий метал | $M_{ст}$ |
| Скрап металевий | $M_{скр}$ | Шлак | $M_{шл}$ |
| Міксерний шлак | $a \cdot M_{чав}/100$ | Конвертерні гази (чадний, вуглекислий, азот, кисень) | $M_{газ}$ |
| Забруднення скрапу | $b \cdot M_{скр}/100$ | | |
| Окалина скрапу | $c \cdot M_{скр}/100$ | Втрати заліза під час продувки | $M_{втр}$ |
| Плавиковий шпат | $M_{плш}$ | | |
| Вапно | $M_{вап}$ | | |
| Випалювання футеровки | $M_{ф}$ | | |
| Дуття | $M_{дуття}$ | | |

Виробнича практика як вітчизняних, так і зарубіжних виробництв, що використовують конвертерну плавку, передбачає її заключну корекцію [93, 107, 110]. Операції корекції виконуються, якщо різниця між приходом і витратою тепла перевищує 0,5–0,8%, що відповідає відхиленню фізичної температури сталі від заданої на 10–15°C.

Найчастіше корекція полягає у введенні додаткового металевого скрапу (брухт, окатиші, залізовмісні брикети) для охолодження надмірно перегрітою сталі. Однак бувають і протилежні випадки, коли необхідно здійснювати додувку з метою підвищення температури або ж вводити вугілля для компенсації надмірно випаленого вуглецю [96].

Будь-яка корекція затягує процес плавки, призводить до збільшення експлуатаційних витрат і як наслідок – собівартості розливої сталі. Тому одним з нагальних питань проектування системи підтримки прийняття рішень у складі інтегрованої системи керування металургійним підприємством [52] має бути уникнення порушень теплового чи матеріального балансу.

Крім цього, як наголошується у [177], витрати матеріалів, що використовуються під час плавки у кисневому конвертері, мають бути раціоналізовані з точки зору економічного критерію вигляду

$$J_1: \sum_{k=1}^p (C_k M_k^{in}) \rightarrow \min \quad (3.5)$$

де C_k – вартість одиниці маси (зазвичай у гривнях за тону) кожного із матеріалів, що входять до шихти.

Питанню саме економічної, а не технологічної оптимізації процесів плавки присвячено ряд робіт, зокрема [226], де показано, що використання залізовмісних брикетів (ЗВБ) із заздалегідь відомим хімічним складом замість скрапу чи металобрухту значно покращує технологічні показники (збільшує вихід годного металу, знижує його окисленість та кількість домішок кольорових металів), але збільшує собівартість. Втім, застосування більш дорогих у

порівнянні зі скрапом ЗВБ, сталевого брухту і навіть чавуну в чушках може бути виправданим при виведенні балансу плавки з поганим початковим хімічним складом чи високою основністю [227].

Оскільки, порушення в ході ведення плавки умов (3.1) або (3.4) призводить до додаткових витрат часу й матеріалів, запропоновано ввести додаткові критерії, які відповідають виконанню умов теплового балансу (J_2) та матеріального балансу (J_3).

Оскільки порушення теплового та матеріального балансу в підсумку мають негативний вплив на собівартість продукції, пропонується для оптимізації шихтування плавки використовувати зведений економічний критерій мінімуму собівартості. Він має полягати у одночасному досягненні екстремумів цільових функцій (3.1), (3.4) та (3.5), тобто у одночасному досягненні мінімуму собівартості матеріалів, теплового балансу та матеріального балансу. Викладене можна записати наступним чином:

$$J = J_1 \cap J_2 \cap J_3 \rightarrow \min. \quad (3.6)$$

Змінними, що використовуються в ході оптимізації, є маса тих чи інших речовин, які оператор конвертера може використати в плавці. Коефіцієнтами – хімічні властивості матеріалів, та вартості, що входять до (3.6).

Типовий датасет початкових даних для розв'язання задачі оптимізації шихти наведений на рис. 3.1, де у верхній частині відображені показники металевих складових, а у нижній – охолоджуючих та шлакоутворюючих матеріалів.

Слід звернути увагу, що далеко не завжди той чи інший матеріал присутній на складі підприємства у довільній кількості, тому інформаційна технологія, що пропонується, має при розв'язанні задачі оптимізації шихти враховувати взаємозамінність матеріалів.

| | Наявність, т | C | Si | Mn | S | P | t |
|----------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|--------|------|
| Чавун рідкий | 2200 | 4.2 | 1.3 | 0.8 | 0.038 | 0.07 | 1290 |
| Чавун в чушках | 450 | 4.3 | 0.8 | 0.7 | 0.035 | 0.05 | |
| Брухт чавуну | 42 | 4.4 | 0.9 | 0.7 | 0.040 | 0.05 | |
| Брухт (10% Кремнію) | 96 | 0.2 | 10 | 0.5 | 0.200 | 0.05 | |
| Брухт сталевий | 110 | 0.2 | 0.1 | 0.5 | 0.040 | 0.025 | |
| Шихта загалом | | 4.047 | 0.763 | 0.735 | 0.049 | 0.051 | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Готова сталь | | C | Mn | S | P | t | |
| | | 0.18 | 0.15 | 0.03 | 0.009 | 1630 | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Матеріали | SiO2 | CaO | FeO | Fe2O3 | MgO | Fe общ | |
| Залізовмісні брикети | 7 | 7 | 33 | 46.2 | 1 | 58 | |
| Руда металева | | | | | | | |
| Окатиші | 9.5 | 0.6 | 1.4 | 87 | 0.8 | 62.5 | |
| Вапно | 2 | 87 | - | - | 1 | - | |
| Вапняк | 1.5 | 49 | - | - | 5 | - | |
| Брикети MgO | | | | | 75 | | |
| Скрап чавунний | 20 | 20 | | | | 61 | |
| Скрап сталевий | 15 | 20 | | | | 65 | |
| Металізований шлак | 20 | 20 | 1 | 85 | | 60 | |
| Плавикий шпат | 7 | 8 | | | | | |
| Доломіт | 12 | 35 | | | 19 | | |

Рис. 3.1. Приклад вхідного датасету для задачі оптимізації шихти

Обмеженнями у даній оптимізаційній задачі є рівняння фізико–хімічних перетворень, зокрема, вирази для складових теплового балансу за (3.2) і (3.3), що мають суттєво нелінійний характер [96]. Крім того, деякі з обмежень мають нечіткий характер, як, наприклад, вже згадана температура виходу сталі з конвертера, яка має знаходитись в межах від 1600 до 1650°C.

Поставлена задача оптимізації матеріально–теплового балансу конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм (3.6) має ознаки багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями [68]. Загальна кількість керованих змінних – 11; кількість лінійних і нелінійних обмежень – 47, серед яких 22 – двосторонні.

Прикладом останнього може бути обмеження для температури готової сталі, яка на момент завершення плавки має бути в межах (градуси Цельсія)

$$1600 \leq t_{cm} \leq 1650. \quad (3.7)$$

Також до двобічних обмежень слід віднести можливі межі маси металевих скрапу, що завантажуються в конвертер (у тонах). Наприклад, для 60-тонного конвертера ПАТ «ДМЗ» це обмеження приймає вигляд

$$5,9 \leq M_{скр} \leq 14,75. \quad (3.8)$$

Для вирішення такої задачі пропонується використовувати еволюційний оптимізаційний алгоритм з використанням комунікативних агентів. В описаній постановці наведена задача вирішувалася у дійсному просторі – оператору пропонується вектор дійсних чисел як кількості матеріалів, що мають бути завантажені до конвертера за час плавки. В реальній ситуації це справедливо по відношенню до рідкого чавуну, вапна та деяких інших сипучих матеріалів. Водночас металевий скрап набирається в ковші дискретними порціями, а залізовмісні та марганцеві брикети мають певну дискретну вагу. Отже перспективою даного дослідження є перехід від безперервної постановки задачі до дискретної.

В подальшому розглянуту задачу та алгоритм її рішення планується використовувати як складову інформаційно-аналітичної системи підприємства, яка буде змінювати виробниче завдання в залежності від наявності матеріалів та зміни їх ринкової вартості.

Практична цінність розв'язання такої задачі полягає у підтримці собівартості сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

3.2 Відновлення функцій математичних моделей розкислення сталі та сертифікації готової продукції

У металургійному виробництві існує актуальна задача відновлення залежностей керуючих функцій розкислення та стану об'єкта управління (механічні властивості готової продукції) від хімічного складу розпеченої сталі в кисневому конвертері. При цьому набір параметрів, що визначають шукані характеристики, відомий заздалегідь.

В розділі 1 сформульовані ключові проблеми та недоліки застосування для відновлення згаданих залежностей як нелінійних регресійних моделей, так і традиційних моделей багаторядного МГВА. Однією з головних причин складності побудови і застосування таких моделей є високі ступені складових поліномів, що описують окремі залежності.

При цьому як зазначено в [149], рідко в яких технічних чи природних системах пара параметрів мають між собою залежність, складнішу за другий порядок. Саме це обумовило пропозицію [147] обмежити ступені поліномів, що входять до виразів (1.2) та (1.4) умовою

$$\sum S_{ij} \leq m, \quad (3.9)$$

де m – заздалегідь визначена максимальна степінь поліному моделі.

Слід відзначити, що нерівність (3.9) обмежує не тільки максимальний рівень змінної x_j в складовій i , а степінь усіх параметрів у складовій. Тобто, для $k=4$ змінних і $m=3$ можливі вирази $a_i x_1^3$, $a_i x_1^2 x_2$, $a_i x_1 x_2^2$, $a_i x_2^3$ та $a_i x_1 x_2 x_3$, або ж входження тих самих змінних у нижчих степенях. При цьому, наприклад, складова $a_i x_1 x_2 x_3 x_4$ буде заборонена по (3.9) – хоча кожна змінна входить до виразу в першому степені, проте сума ступенів усіх змінних більша за $m=3$.

Подібне обмеження дозволило авторам [147] застосувати до розв'язання задачі розрахунку невідомих коефіцієнтів виразу (1.4) еволюційний генетичний алгоритм, адже замість хромосом довжиною $m^k - 1$ матимемо лише

$$M = \frac{(m+k)!}{m! n!} \quad (3.10)$$

можливих складових. Наприклад, для залежності границі міцності сталі від хімічного складу та товщини готового виробу ($k=9$ змінних), якщо припустити входження у моделі ступенів змінних від 0 до 3 ($m=4$), замість 262143 можливих складових розглядаються лише 715.

Знайти рішення для задачі такої складності можна навіть повним перебором можливих моделей. Однак, як показала серія експериментів з відновлення апроксимаційних функцій з використанням моделей вигляду (1.2)–

(1.3) та скорочених поліномів вигляду (1.4) та (3.9), проведених на ряді підприємств Дніпропетровщини, відновлення функцій розкислення та результуючих механічних характеристик за цими методами має обмежену точність.

Оцінка коефіцієнтів парної кореляції між окремими вхідними аргументами (складові хімічного аналізу) та змінною, що описує шукану функцію, майже в половині випадків мала від'ємне значення. І хоча коефіцієнт парної кореляції свідчить лише про наявність та міру лінійного зв'язку, подібні результати, зокрема, представлені в таблиці 3.2, дозволяють припустити наявність суттєвих зворотних зв'язків між предикторами та вихідними змінними.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти парної кореляції між механічних властивостей сортового прокату та показниками хімічного складу сталі

| Показники хімічного складу, % | Механічні характеристики сортового прокату | | | | |
|-------------------------------|--|-----------------------|--|--|------------------------|
| | Границя текучості, МПа | Границя міцності, МПа | Ударна в'язкість при $t = -20^{\circ}\text{C}$, Дж/м ² | Ударна в'язкість після механічного старіння, Дж/м ² | Відносне подовшення, % |
| Вуглець | 0,084097 | 0,133192 | -0,08043 | 0,009997 | -0,14025 |
| Марганець | -0,11697 | -0,16656 | -0,05853 | 0,025829 | 0,113689 |
| Кремній | 0,02797 | -0,16319 | 0,076881 | 0,159299 | -0,06278 |
| Сірка | 0,129429 | -0,24827 | -0,08207 | -0,04637 | -0,12497 |
| Фосфор | 0,250497 | -0,18007 | -0,17694 | -0,09435 | 0,072617 |
| Хром | -0,03198 | -0,04063 | -0,05504 | -0,10765 | 0,115402 |
| Нікель | 0,119189 | -0,12141 | -0,15062 | -0,24716 | -0,01625 |
| Мідь | 0,078779 | -0,1984 | -0,38222 | -0,45227 | -0,1956 |
| Товщина полки, мм | -0,03506 | -0,47014 | -0,09082 | -0,24628 | -0,39667 |

Введення в моделі (1.4) дозволу на від'ємність степенів S_{ij} дозволяє не тільки значно підвищити фізичну відповідність моделей сутності процесів, а й створити новий тип предикторів, а саме різні співвідношення. Використовуючи замість (3.9) обмеження

$$\sum |S_{ij}| \leq m \quad (3.11)$$

можна отримати в якості складових результуючого поліному базові функції вигляду, наприклад $a_{ij} \frac{x_i}{x_j}$. Як показують дослідження [228], саме на подібні

співвідношення приходить найбільший внесок інформації про механічні властості матеріалу, яку можна отримати з хімічного аналізу. Наприклад, пластичність матеріалу набагато краще корелює із відношенням вмісту фосфору до сірки x_5/x_4 ніж з кожним з цих параметрів окремо.

Слід зауважити, що поліноми, які забезпечують для функцій апроксимації прийнятний рівень критерію регулярності, найчастіше натикаються на проблему нестачі вхідних даних. З одного боку, чим складніший характер мають моделі, тим менша їх середньоквадратична похибка апроксимації. З іншого – чим більше коефіцієнтів у моделі, отриманій за обмеженою кількістю прикладів даних, тим нижча їх якість, гірша t – статистика і, як наслідок, адекватністю усієї апроксимаційної моделі. Як наслідок – майже випадкові результати на виході моделі в разі пред'явлення на вхід нових даних, що виходять за діапазони навчальної вибірки.

З огляду на це пропонується ввести штрафну функцію на розмірність апроксимаційного поліному. Зокрема, у традиційний [153] критерій регулярності пропонується додати складову штрафу у вигляді тиску розмірності

$$J(A, M) = \sum_{t=1}^N (Y_t - y_t)^2 + \alpha M \rightarrow \min \quad (3.12)$$

де A – вектор коефіцієнтів при складових поліному a_i ; M – кількість ненульових значень коефіцієнтів; y_t – значення вихідної змінної в прикладі $t = 1..N$; Y_t – значення апроксимаційної функції в тому ж прикладі; α – параметр тиску розмірності, $0 < \alpha < 1$.

Значення, що може приймати параметр тиску розмірності та його вплив на результати апроксимації – матеріал окремого дослідження, започаткованого в [228, 229]. Рекомендації щодо його вибору будуть дані в останньому розділі даної роботи.

Запропонований штраф за розмірність функції також має об'єктивне обґрунтування з точки зору технологічного процесу. Річ у тому, що система підтримки прийняття рішень, якою користується оператор конвертерного

виробництва [230], повинна мати якомога простішу організацію з точки зору використання пам'яті та швидкодії. Більшість робочих місць не обладнані ЕОМ, тож використання функції апроксимації кладеться або на мікроконтролер з обмеженим обсягом пам'яті, або ж на віддалений комп'ютер, зв'язок з яким виконується каналом низької пропускної здатності. Десятки (іноді сотні) коефіцієнтів, які породжуються традиційними методами самоорганізації моделей, практично унеможливають застосування таких функцій на практиці.

Запропонований підхід до побудови апроксимаційних функцій був застосований до синтезу і оптимізації двох моделей у складі загальної інтегрованої СППР керування металургійним виробництвом, а саме для відновлення залежностей механічних характеристик готової продукції від хімічного складу сталі до розкислення та для розрахунку потреби у феросплавах в процесі розкислення вуглецевої сталі при її конвертерному виробництві.

В якості розрахункових алгоритмів розв'язання задачі (3.12) з обмеженням (3.11) були застосовані ряд евристичних методів одноагентного та багатоагентного пошуку оптимальних рішень. Найкращу ефективність показав гібридний алгоритм на основі моделювання штучної імунної системи, докладно описаний у наступних розділах.

3.3 Прогнозування стійкості футеровки конвертера

Виходячи з постановки, викладеної у другому розділі, вирішувалась задача побудови прогнозної моделі, яка б за технічними характеристиками футеровки та статистичними показниками ведення плавки операторами давала прогноз щодо залишку терміну роботи поточної футеровки. Розв'язання такої задачі потребує, по-перше, вибір такого набору предикторів, який був би мінімальним, але достатнім для прогнозування; по-друге, побудови відносно простої і фізично обґрунтованої моделі. Остання має використовуватись в якості складової автоматизованої інтелектуальної СППР виробництва прокату, сповіщаючи

оператора конвертерного цеху про ресурс поточної футеровки, а також надаючи поради щодо методів ведення плавки, які б збільшили ресурс футеровки.

Задача ідентифікації закономірностей процесу вигорання футеровки від технічних та технологічних факторів та залежностей, що їх описують, формально полягає у побудові математичної чи математично-логічної моделі M за результатами спостережень, такої, що забезпечувала б максимально точне відображення

$$M^*: X \rightarrow Y, \quad (3.13)$$

де $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ - множина векторів незалежних параметрів процесу (факторів) $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$; $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_k\}$ - множина векторів цільових змінних $Y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jl})$; n - кількість навчальних прикладів; k - кількість можливих значень цільової функції (при навчанні на прикладах, вважаючи простір рішень безперервним, слід вважати $k = n$); m - кількість незалежних змінних; l - кількість змінних у векторі, що описує цільову функцію (спрощено $l = 1$, адже нас цікавить насамперед термін експлуатації футеровки).

Подібна модель дозволить оцінити ресурс футеровки, а також – що найважливіше – керувати цим ресурсом, використовуючи множину доступних ресурсів [231].

Втім, як було сказано, для спостереження за процесом, що триває 1500, а бажано – 2500-3000 плавок, необхідно фіксувати велику кількість даних, що описують усі вищезгадані фактори. Згідно із загальною концепцією побудови інформаційної технології керування металургійним підприємством [52], всі дані про процеси на окремих ділянках мають зводитися до єдиної бази даних. Для багатовимірного аналізу інформації, що надходить у обсягу 10^5 - 10^6 записів на тиждень, необхідно використовувати сучасні сховища даних [157]. Сховища даних повинні забезпечувати високу швидкість отримання даних, можливість отримання і порівняння так званих зрізів даних, а також несуперечність, повноту і достовірність даних.

Ключовим компонентом побудови та застосування сховищ даних є OLAP [144]. Ця технологія заснована на побудові багатовимірних наборів даних - OLAP-кубів, осі якого містять параметри, а клітинки - залежні від них агрегатні дані. Саме узагальнення за певними метриками (середнє значення, максимум, медіана, мода, тощо) визначає як майбутній вигляд прогностичної моделі, так і можливі методи її отримання. Використання згаданої технології було застосовано в [232 – 234]. Двоетапний підхід на основі кластерного аналізу з використанням методу головних компонент та наступною побудовою лінійних регресійних моделей прогнозування стану футеровки для кожного з отриманих кластерів докладно розглянутий у [235].

Частина факторів, які впливають на стійкість футеровки, мають категорійний характер і не можуть включатися до регресійних моделей, заснованих на дійсних змінних, заданих на вільно масштабованих шкалах. Ба більше для таких характеристик (номер конвертера, пора року, виробник та інші) взагалі неможливість увести простір (метрику), що мав би сенс. Вплив категорійних ознак на стійкість футеровки ілюструють рисунки 3.2 та 3.3, на яких показані зведені діаграми перерізів OLAP-кубів за цими ознаками попарно.

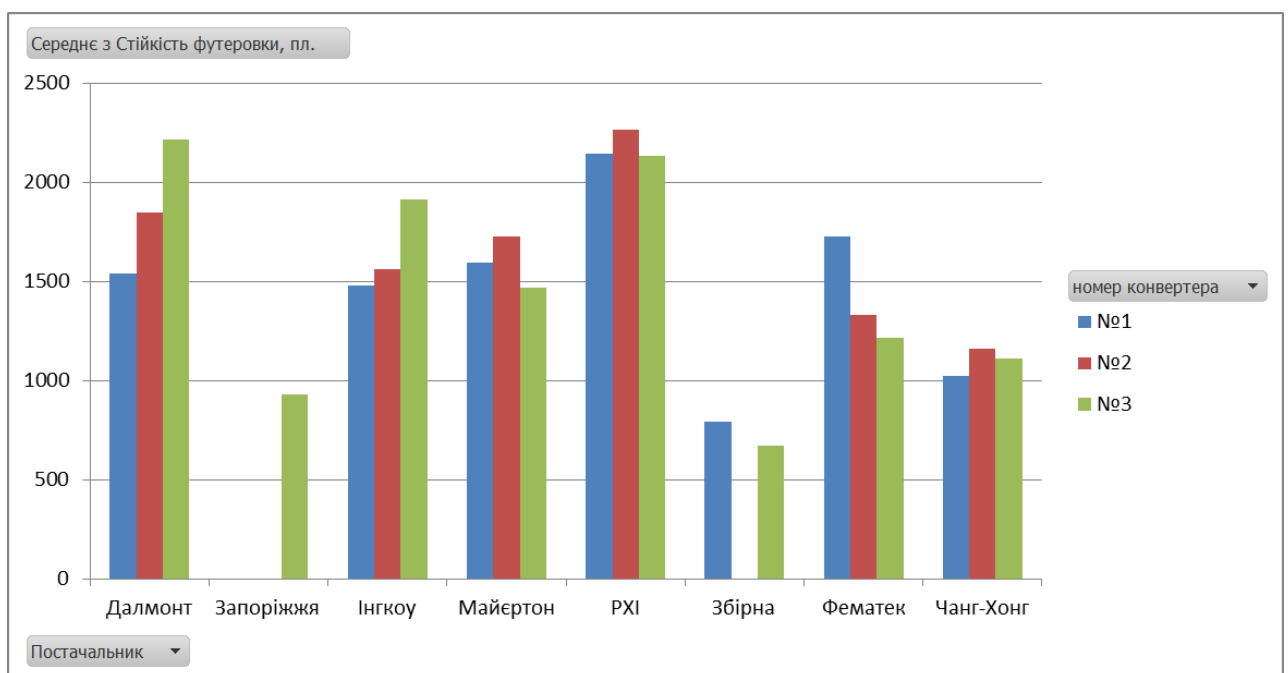


Рис. 3.2 – Залежність середнього часу роботи футеровки від виробника та номеру конвертера

Зокрема, як видно з рисунка 3.2, виробник футеровки є одним з ключових факторів, який визначає її довговічність. На діаграмі помітний розкид середніх значень у групах за виробником більше 1000 плавок.

Суттєвість впливу виробника на стійкість футеровки підтверджується критеріями Фішера та Краскела-Уолліса [146], який надає нам підстави стверджувати, що виробник футеровки значним чином впливає на стійкість футеровки конвертера. При цьому статистична перевірка залежності тривалості роботи футеровки від номера конвертера, на якому вона була встановлена, виявляється не статистично значима за критеріями Фішера, Краскела-Уолліса та тестом Левене [223].

Водночас було виявлено, сезон початку експлуатації футеровки також є важливим фактором. З огляду на рисунок 3.3, можна сказати про вплив на тривалість експлуатації футеровки пори року, коли вона розпочинає роботу та тої пори, на яку припадає більша частина її експлуатації.

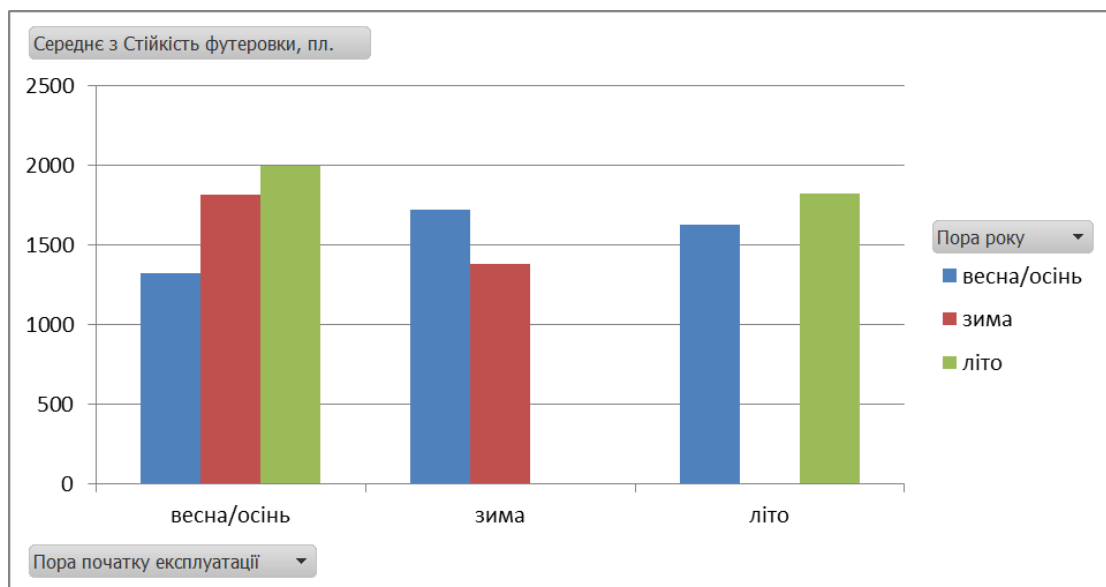


Рис. 3.3 – Залежність середнього часу роботи футеровки від пори року експлуатації

Як видно, мало з футеровок працюють більше ніж в одному сезоні, жодна не працює у трьох (встановлені взимку не працюють до літа і навпаки). При цьому футеровки, встановлені і експлуатовані у теплу пору року, в середньому

мають статистично більший термін роботи. Хоча за тестами Левене та Шапіро-Уїлка [149] залежність має не суттєвий характер, застосування методу Краскела-Уолліса дає підставу вважати, що пора року впливає на стійкість футеровки конвертера, хоча її вплив досить незначний.

Надалі для використання факторів пори року та виробника в кількісному вигляді, в кожній групі проведено заміну всіх членів на середнє значення для групи та кожен фактор поділено на найменше середнє значення для збереження відстані між групами.

Певні перетворення даних, ілюстровані рисунком 3.4, дозволяють визначити ще один початково прихований фактор – середнє навантаження на футеровку за час її експлуатації. Як можна побачити, навіть на невеликій виборці футеровок, які охоплюють дані на рисунку, середнє добове навантаження на футеровку коливається в доволі широких межах – від 15 до 36 плавок на добу.

| № з/п | Рік | Постачальник | Конвертер | Дати роботи | Пора року | Пора початку | Днів | X1 | Y | x2 | x3 |
|-------|------|--------------|-----------|----------------|-------------|--------------|------|----------------------|--------------------------|--------------------|------------------|
| | | | | | | | | Навантаження пл/день | Стійкість футеровки, пл. | Кількість додувок, | Середній вміст у |
| 1 | 2004 | Чанг-Хонг | №2 | 14.11-14.01.04 | зима | весна/осінь | 60 | 20.30 | 1218 | 17.30 | 0.87 |
| 2 | 2004 | Чанг-Хонг | №1 | 19.12-28.01.04 | зима | зима | 39 | 27.31 | 1065 | 18.93 | 0.86 |
| 3 | 2004 | Фематек | №3 | 09.01-18.02.04 | зима | зима | 39 | 29.38 | 1146 | 20.83 | 0.89 |
| 4 | 2004 | Сборная | №1 | 16.02-18.03.04 | весна/осінь | зима | 32 | 28.56 | 914 | 17.55 | 0.9 |
| 5 | 2004 | Чанг-Хонг | №2 | 28.01-29.03.04 | весна/осінь | зима | 31 | 36.03 | 1117 | 19.99 | 0.88 |
| 6 | 2004 | Ингкоу | №3 | 27.02-20.04.04 | весна/осінь | зима | 53 | 25.79 | 1367 | 17.80 | 0.91 |
| 7 | 2004 | Фематек | №2 | 19.04-02.06.04 | весна/осінь | весна/осінь | 43 | 32.07 | 1379 | 14.90 | 0.83 |
| 8 | 2004 | Ингкоу | №1 | 29.03-21.06.04 | весна/осінь | весна/осінь | 82 | 19.63 | 1610 | 15.76 | 0.85 |
| 9 | 2004 | Ингкоу | №3 | 06.05-31.08.04 | літо | весна/осінь | 114 | 23.82 | 2715 | 14.76 | 0.8 |
| 10 | 2004 | Майертон | №2 | 15.06-05.09.04 | літо | літо | 80 | 21.75 | 1740 | 15.08 | 0.79 |
| 11 | 2004 | Фематек | №1 | 29.07-02.10.04 | літо | літо | 63 | 27.43 | 1728 | 15.45 | 0.84 |
| 12 | 2004 | Чанг-Хонг | №3 | 22.09-07.12.04 | весна/осінь | весна/осінь | 75 | 17.87 | 1340 | 16.73 | 0.87 |
| 13 | 2005 | Чанг-Хонг | №2 | 2.11-18.01.05 | зима | весна/осінь | 76 | 15.00 | 1140 | 17.29 | 0.86 |
| 14 | 2005 | Чанг-Хонг | №1 | 15.12-5.02.05 | зима | зима | 50 | 18.02 | 901 | 18.90 | 0.87 |
| 15 | 2005 | Ингкоу | №3 | 18.01-01.03.05 | зима | зима | 43 | 29.40 | 1264 | 18.21 | 0.81 |
| 16 | 2005 | Ингкоу | №2 | 4.02-29.03.05 | весна/осінь | зима | 53 | 25.51 | 1352 | 21.75 | 0.8 |

Рис. 3.4. Середнє навантаження на футеровку як додатковий фактор

При цьому середнє квадратичне відхилення по деяких плавках сягає 10 і більше. Відтак навантаження на футеровку протягом доби може сягати більше 40 плавок при рекомендованій граничній кількості 30-33 (залежно від виробника). Звичайно, надмірна експлуатація призводить до більш швидкого руйнування футеровки [224]. На рисунку 3.5 показана зведена діаграма, що ілюструє вплив середнього навантаження футеровки на її термін роботи.

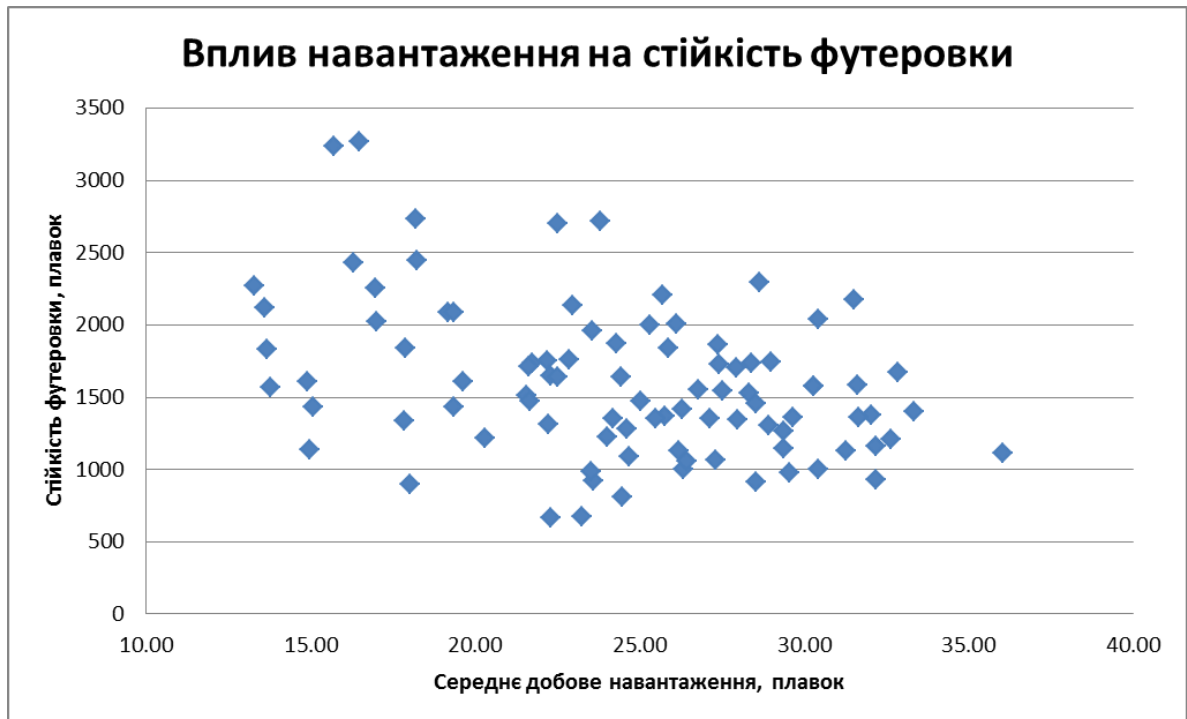


Рис. 3.5. Вплив середнього навантаження на стійкість футеровки

Хоча ці величини залежні й з невисоким показником коваріації (для нелінійних моделей не більше 0,2), втім цей вплив має враховуватись в прогнозуючій моделі.

Спираючись на отримані дані про 145 551 плавку, отримані з бази даних плавков на трьох 60-тонних конвертерах сталеплавильного цеху ПАТ «ДМЗ», до розгляду були взяті наступні фактори:

- X1 - Частка плавков з додувкою, %;
- X2 - Середній вміст у чавуні Si, %;
- X3 - Середній вміст у чавуні Mn, %;
- X4 - Середній вміст у чавуні S, %;
- X5 – Середня основність, відн. од.;
- X6 - Відсоток плавков з основністю < 2,8 од.;
- X7 - Відсоток плавков з Si>0,90 %;
- X8 - Відсоток плавков з Mn<0,30 %;
- X9 - Відсоток плавков з S>0,050 %;
- X10 - Відсоток плавков з C≤0,10 %;

- X11 - Відсоток плавок з $T > 1640$ °С;
 X12 - Відсоток плавок з $T < 1600$ °С;
 X13 – Середній вміст Fe в шлаку, %;
 X14 – Середній вміст MgO в шлаку, %;
 X15 – Кількість плавок зі скрапом, шт.;
 X16 – Кількість торкретувань, разів;
 X17 - Кількість плавок з торкретуванням, %;
 X18 - Кількість азотувань, разів (з плавкою);
 X19 - Кількість плавок з азотуванням, %;
 X20 - Кількість плавок зі скачуванням шлаку, %;
 X21 – Використано плавикового шпату, т.
 До цих факторів з наведених вище міркувань було долучено
 X22 – Навантаження конвертера, плавок/день;
 X23 – Пора року початку експлуатації;
 X24 – Виробник футеровки.

Єдиною залежною змінною виступає Y – стійкість футеровки конвертера, що вимірюється у кількості плавок. Загалом розглянуті 91 футеровка, що мали комплектні дані за усіма змінними.

Для оцінки нелінійного зв'язку між факторами та стійкістю футеровки конвертера використовуємо коефіцієнт детермінації згідно з [150]. Результати зведемо у таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти детермінації факторів, що впливають на стійкість футеровки

| | | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Фактор | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | X11 |
| K_d | 0,226 | 0,152 | 0,355 | 0,312 | 0,334 | 0,413 | 0,173 | 0,265 | 0,235 | 0,276 | 0,33 |
| Фактор | X12 | X13 | X14 | X15 | X16 | X17 | X18 | X19 | X20 | X21 | X22 |
| K_d | 0,074 | 0,338 | 0,342 | 0,423 | 0,5 | 0,253 | 0,906 | 0,28 | 0,294 | 0,048 | 0,388 |

Фактори X23 та X24 якісні, тому не включені в таблицю. Їх вплив на результуючу характеристику конвертера досліджено вище.

Надалі з розгляду виключаються фактори, що повторюють фізичні величини, близькі за сенсом, а відтак колінеарні. При цьому визначальним, кого з пари факторів залишити, а кого вилучити, обираємо за значенням коефіцієнту детермінації. Наприклад, в подальшому з пари факторів X5 та X6 пропонується лишити другий, оскільки вони логічно пов'язані, а X6 має більший вплив на залежну змінну. Користуючись таким підходом з подальшого розгляду також вилучаємо фактори X2, X8, X9, X12, X17 та X19.

При цьому фактори X19 (відсоток плавок з азотуванням) та X2 (середній вміст у чавуні Si, %) відкинуті попри рекомендації щодо їх контролю рядом авторів [236, 237]. За даними досліджень, більше інформації про характер процесів, що відбуваються з плином часу у футеровці конвертера, мають відповідно фактори X18 (кількість азотувань, разів) та X7 (відсоток плавок з $S_i > 0,90$). Вони ж мають вищі значення коефіцієнту детермінації.

Важливим етапом розвідувального аналізу даних також є виявлення мультиколінеарності. Проблема мультиколінеарності призводить до нестійкості параметрів моделі, що не дозволяє правильно інтерпретувати внесок кожного фактору в модель [151]. Традиційним способом оцінки мультиколінеарності є аналіз кореляційної матриці (рис. 3.6).

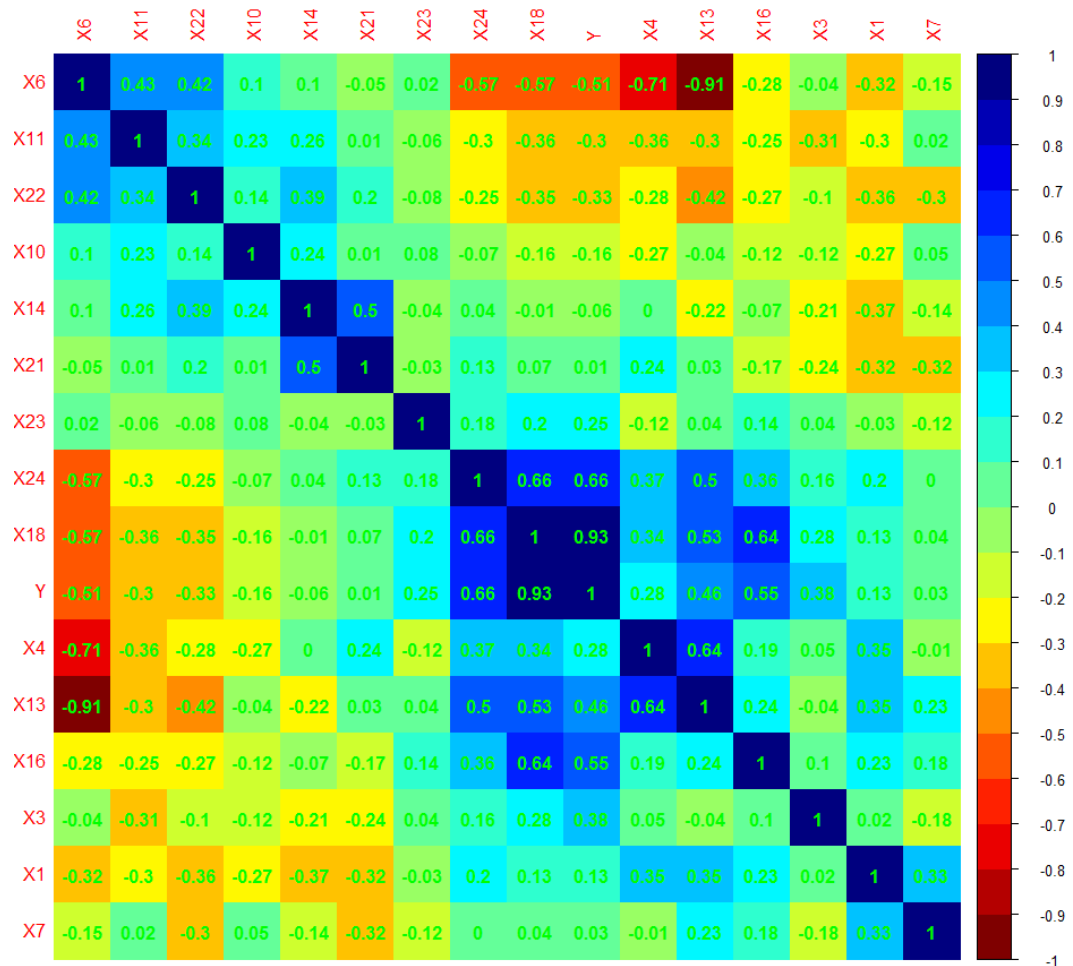


Рис. 3.6. Кореляційна матриця факторів та результуючої величини

З рисунка 4.6 помітно, що існує значна від'ємна кореляція між факторами X6 (Відсоток плавок з основністю < 2,8 од.) та X13 (Середній вміст Fe в шлаку). Це також підтверджує і так званий показник інфляції дисперсій (Variance Inflation Factor, VIF) [146], значення якого для факторів, що лишилися, представлені в таблиці 4.4, де різко відрізняються значення для X6 та X13.

Таблиця 3.4 – Значення показника інфляції дисперсії

| Фактор | X1 | X3 | X4 | X6 | X7 | X10 | X11 | X13 | X14 | X16 | X18 | X21 | X22 | X23 | X24 |
|--------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|------|------|-----|-----|------|------|------|
| VIF | 1.96 | 1.42 | 3.14 | 7.4 | 1.58 | 1.34 | 1.9 | 7.81 | 2.21 | 2.16 | 3.5 | 1.9 | 1.77 | 1.35 | 1.21 |

На основі отриманих даних, приймаємо надалі, що до моделей може входити лише одна зі змінних – X6 або X13 – та, що забезпечує краще значення зовнішнього критерію оцінки моделі.

Слід відзначити, що перед побудовою моделей стійкості футеровки всі стовпці даних були нормовані і центровані відносно середніх значень, а для запобігання можливому впливу автокореляції перед кожним етапом побудови моделі рядки даних перемішувалися випадковим чином. В підсумку розвідувального аналізу даних до майбутніх моделей були відібрані 15 факторів, серед яких конкурентними є X6 та X13, що мають лінійну кореляцію, і не можуть включатися в модель одночасно.

Для перевірки однорідності отриманих даних було проведено кластерний аналіз методом Уорда [144] з мангеттенівською метрикою відстані між дослідженнями. Результати кластерного аналізу наведені на рисунку 3.7.

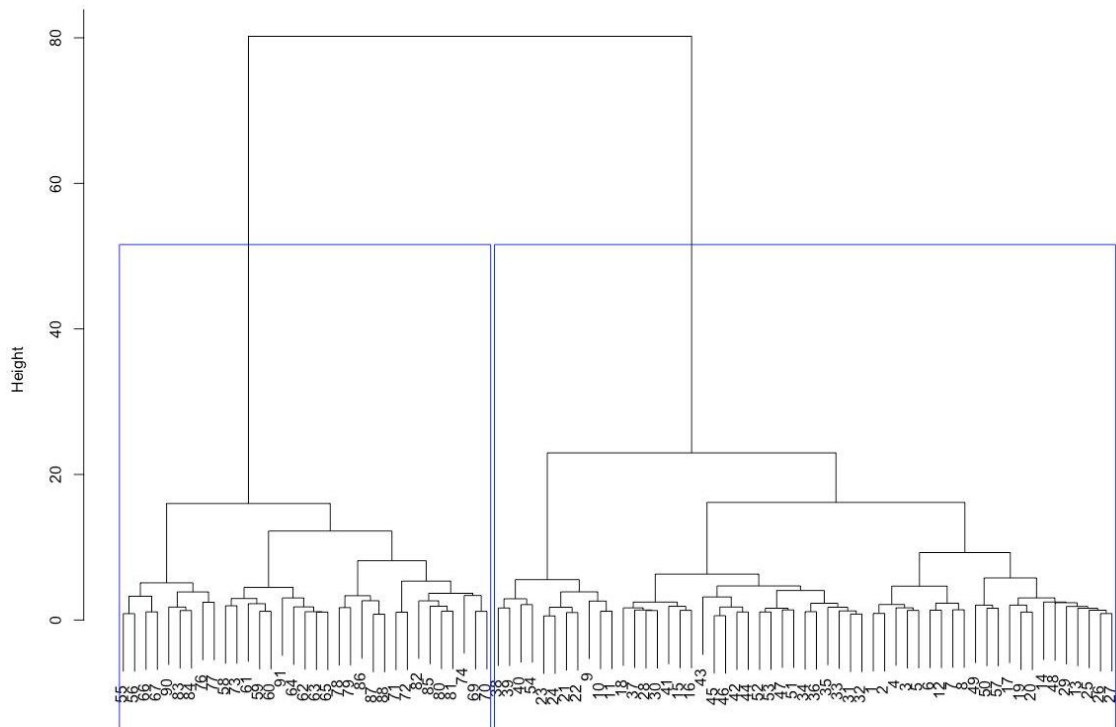


Рис. 3.7 – Дендрограма ієрархічного кластерного аналізу методом Уорда

Як видно з рис. 3.7, в досліджуваних даних є чітко виражені два кластери. Такі ж дані були отримані при кластеризації методом k-середніх з підбором оптимальної кількості кластерів.

Для інтерпретації отриманих кластерів були розраховані перші дві головні компоненти, які пояснюють 44% дисперсії спостережень. Всі не відкинуті як випадкові відхилення спостереження в просторі перших двох головних компонент наведені на рисунку 3.8, де явно помітне розділення

спостережень на два кластери. Також на рис. 3.8 можна бачити, що данні не мають значних викидів.

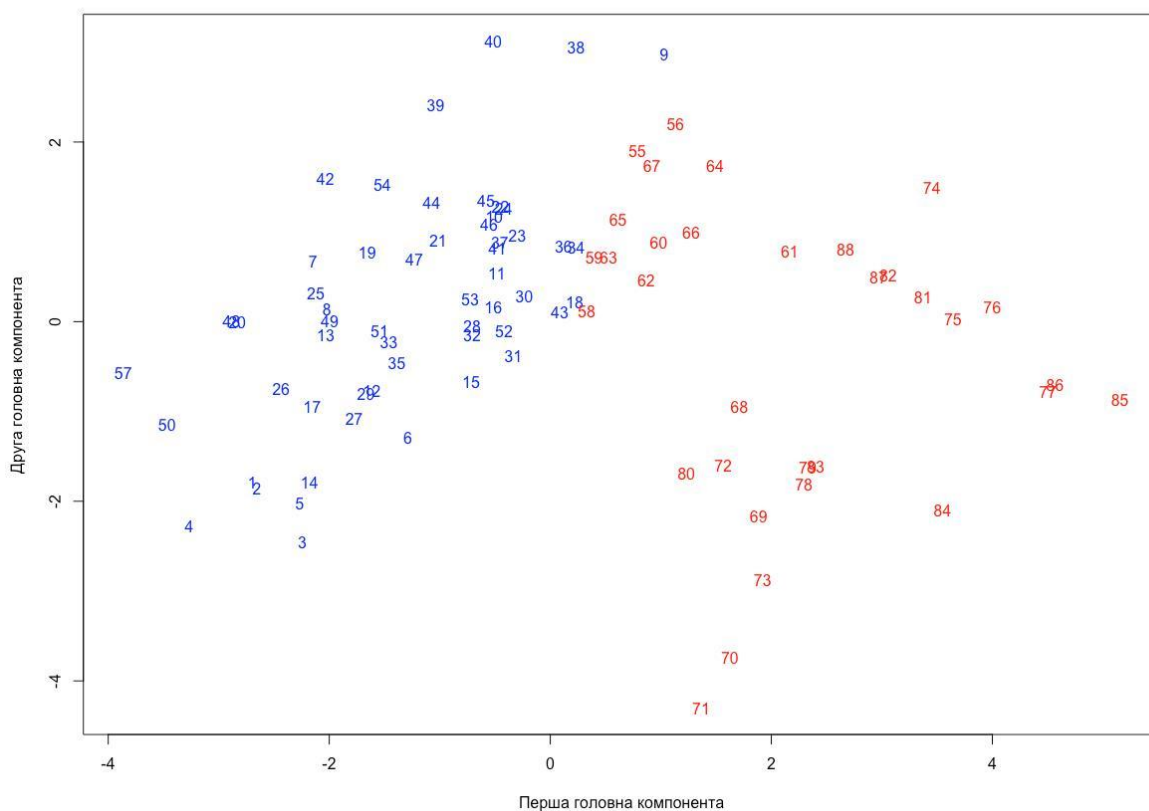


Рис. 3.8. Експериментальні точки у координатах першої та другої головної компоненти та їх розподіл по кластерах

Розподіл експериментальних даних по кластерах на рис. 3.8 показує, що визначальною є перша головна компонента. Її вираз для нормованих і центрованих даних

$$Y = 0.43x_{18} + 0.38x_{24} + 0.33x_{16} + 0.33x_{13} + 0.29x_{11} + 0.27x_1 + 0.23x_4 + 0.13x_{10} + 0.13x_{14} + 0.13x_3 + 0.1x_{23} + 0.07x_{21} + 0.07x_7 \quad (3.14)$$

З вигляду залежності (3.14) можна побачити, що в першу головну компоненту з високими вагами входять фактори X_{18} , X_{24} , X_{16} , X_{13} , X_{11} , X_1 та X_4 . Проаналізувавши відношення між центрами мас отриманих кластерів, можна побачити, що у другому кластері в порівнянні з першим:

- кількість шлакувань (фактор X_{18}) в середньому більша на 60%;

- серед виробників футеровки (X24) зустрічаються майже виключно «Далмонт», «Майертон» та «Інгкоу»;
- кількість торкретувань (X16) збільшилась в середньому на 43%;
- середній вміст заліза в шлаку (X13) більше в середньому на 13%, що в свою чергу суттєво збільшило і основність шлаку (падіння X6);
- відсоток плавки з перевищенням температури (X11) збільшився в середньому на 20%;
- кількість додувок (X1) в середньому збільшилась на 40%, це пояснює збільшення температури в конвертері;
- кількість сірки (X4) збільшилась на 16% - це пояснює як збільшення температури в конвертері, так і збільшення основності шлаку, оскільки сірку дуже важко переплавити.

Поділ експериментальних даних на кластери дає додаткову інформацію, що дозволяє в подальшому точніше побудувати результуючу прогностичну модель стійкості футеровки. Зокрема, залежність стійкості від вмісту в чавуні сірки (X4) теоретично є зворотно-пропорційною [64]. Водночас на повних даних цю залежність важко помітити, а лінійна регресія навіть має додатний коефіцієнт. Розділивши дані на два кластери методом головних компонент, отримуємо лінійні залежності, що співпадають з теоретичними.

Використовуючи комбінаторний алгоритм покрокового регресійного аналізу на основі методу найменших квадратів [149], для кожного з згаданих кластерів були отримані залежності стійкості футеровки від значимих факторів, що мають вигляд:

- для першого кластера

$$Y = a_0 - a_1x_4 + a_2x_{18} - a_3x_{21} + a_4x_{24}; \quad (3.15)$$

- для другого кластера

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_3 - a_3x_{10} - a_4x_{13} - a_5x_{16} + a_6x_{18}; \quad (3.16)$$

Значення F-статистики для кожного з рівнянь менше 10^{-15} . Величина скорегованого R^2 дорівнює відповідно: для моделі (3.15) першого кластеру –

0.9077, а для моделі (3.16) другого кластеру – 0.9203. Обидві моделі повністю відповідають умовам теореми Гауса-Маркова (залишки мають нормальний розподіл, постійну дисперсію та не корельовані), а також містять лише статистично значимі коефіцієнти. Виходячи з цього, надалі приймаємо моделі (3.15) та (3.16) в якості оціночних при прогнозуванні стійкості футеровки.

Аналізуючи отриманий результат, легко помітити, що моделі суттєво відрізняються, спираючись лише на один спільний фактор, а саме – позитивний вплив кількості азотувань (X_{18}). Для практичного ж застосування моделей (3.15)-(3.16) необхідно спочатку вірно ідентифікувати кластер, в який попадає поточна сесія роботи футеровки, а потім скористатися відповідною моделлю.

Як альтернативну модель прогнозування стійкості футеровки пропонується отримана шляхом самоорганізації модель за методом групового урахуванням аргументів. В якості опорної функції використаємо модель другого порядку

$$y = a_0 + a_1 x_i^s + a_2 x_j^s + a_3 x_i^s x_j^s, \quad (3.17)$$

де s – це ступінь, що надалі обмежується умовою $|s| \leq 1$, докладно обґрунтованою в другому розділі.

Така опорна функція, на відміну від традиційної

$$f(x_1, x_2) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2, \quad (3.18)$$

дозволяє використанням від’ємних ступенів вхідних змінних врахувати вплив відношення параметрів, а не лише їх суми чи добутку.

В якості внутрішнього критерію вибору часткових моделей використаємо критерій Акаїке [149]

$$AIC = 2k - n \ln \left(\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2 / n \right), \quad (3.19)$$

що обмежує кількість параметрів моделі.

Для вибору найкращих моделей в кожному ряду селекції використаємо зовнішній критерій стандартної перехресної перевірки, що більш вимогливий

ніж класичний зовнішній критерій регулярності, запропонований автором методу [153].

З урахуванням викладеного, була отримана модель наступного вигляду

$$Y = a_0 + a_1V_1 + a_2V_2 - a_3V_2/V_1, \quad (3.20)$$

де

$$\begin{cases} V_1 = a_5U_1 + a_6U_2, \\ V_2 = a_7U_3 - a_8/U_4 - a_9/U_3^2, \\ U_1 = a_{10} + a_{11}/x_7 + a_{12}x_{18} - a_{13}x_7x_{18}, \\ U_2 = a_{14} + a_{15}x_3 + a_{16}x_{18} + a_{17}x_3x_{18}, \\ U_3 = a_{18} + a_{19}x_6 + a_{20}x_{18} - a_{21}x_{18}^2, \\ U_4 = a_{22} + a_{23}x_{11} + a_{24}x_{18} - a_{25}x_{18}^2. \end{cases} \quad (3.21)$$

Загалом після підстановки і приведення подібних моделей має 25 дійсних коефіцієнтів та спирається на п'ять факторів: X3, X6, X7, X11 та X18. Останній входить до моделі декілька разів в різних ступенях, що свідчить про наявність сильної нелінійної залежності.

Модель (3.20)-(3.21) в порівнянні з моделями (3.15) та (3.16) було оцінено за рядом критеріїв, що ілюструє таблиця 3.5, у якій використані наступні позначення: N – кількість членів апроксимаційного поліному (коефіцієнтів, що відновлюються); R^2 – коефіцієнт детермінації (між прогнозованими та реальними значеннями стійкості футеровки); SD – середня квадратична відносна похибка апроксимації; CV_{crit} – критерій крос-перевірки розрахований на основі оцінки стандартного відхилення; F -statistic – p -значення F -статистики Фішера; $Ramsey\ test$ - p -значення тесту Ремзі.

Таблиця 3.5 – Порівняння прогнозуючих моделей

| | N | R^2 | SD | CV_{crit} | F -statistic | $Ramsey\ test$ |
|----------------------|-----|--------|--------|-------------|----------------|----------------|
| Модель (4.15)-(4.16) | 10 | 0.9313 | 0.0687 | 0.2212 | <2.2e-16 | 0.6619 |
| Модель (4.20)-(4.21) | 25 | 0.9393 | 0.0607 | 0.1992 | <2.2e-16 | 0.2518 |

З таблиці 3.5 ми можемо побачити, що за даними зовнішнього критерію крос-перевірки та внутрішніми критеріями детермінації та помилки кращою є модель (3.20)-(3.21), яка водночас є гіршою з точки зору кількості коефіцієнтів, які необхідно відновити, а також тестом Ремзі. Останній дозволяє стверджувати, що у моделях достатня кількість регресорів. Водночас за значеннями F-статистики для обох моделей можна відхилити нульову гіпотезу про незначимість регресії. Відтак, можна побачити, що обидві побудовані моделі адекватно описують реальний процес.

У зв'язку з невеликою різницею між оцінками, розрахованими за критеріями регулярності, Акаїке та стандартної перехресної перевірки для отриманих моделей надалі рекомендується:

- використання для оціночного прогнозування стійкості футеровки лінійної моделі (3.15) – (3.16), побудованої за допомогою комбінаторного алгоритму покрокового регресійного аналізу з урахуванням попередньої ідентифікації кластеру для поточної футеровки;

- використання комплексної моделі, отриманої за МГУА, для більш тонкого аналізу впливу окремих факторів на усталений режим роботи футеровки.

Підсумовуючи викладене, автором запропонована двоетапна модель класифікації спочатку за категорійними параметрами, а потім за числовими, що дозволяє суттєво зменшити простір пошуку за рахунок формулювання для більшості виділених кластерів простих регресійних моделей з високою точністю прогнозування. Запропоновано в якості фактору, що визначає клас зносу футеровки величину навантаження у кількості плавок за зміну, що дозволило вірно класифікувати більше 80% футеровок.

3.4 Висновки до розділу 3

1. При шихтуванні сталі одночасно з економічним критерієм мінімуму її собівартості має враховуватись виконання технологічних критеріїв нульового матеріального та теплового балансу плавки. Запропонована математична модель шихтування, що враховує зазначену багатокритеріальність та використовує 11 керованих змінних та 47 лінійних й нелінійних обмежень, з яких 22 – двосторонні. Застосування удосконаленої математичної моделі шихтування в складі СППР виробництва прокату дозволяє підтримувати собівартості сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

2. Використання в регресійних моделях механічних характеристик сортового прокату від'ємних ступенів предикторів та штрафу на розмірність поліному забезпечує підвищення точності моделі з одночасним зменшенням кількості її параметрів, що дозволяє замінити безпосередні вимірювання статистичними прогнозами та скоротити час і вартість сертифікації готової продукції. Такий підхід дозволив підвищити фізичну відповідність моделей сутності процесів, а також отримувати моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації.

3. Двоетапна класифікація поточного процесу функціонування футеровки плавильного агрегату спочатку за категорійними показниками, а потім за числовими дозволяє зменшити кількість невідомих параметрів моделі прогнозування та час на пошук цих параметрів. Розроблена двоетапна математична модель, яка за технічними характеристиками футеровки та параметрами ведення плавки забезпечує статистично значимий прогноз щодо залишку терміну роботи поточної футеровки. Використання розробленої моделі в якості складової алгоритму інтегрованої СППР виробництва прокату дозволяє отримувати перед початком кожної плавки інформацію про ресурс поточної футеровки, а також поради щодо керуючих рішень, які б збільшили її ресурс.

РОЗДІЛ 4. ГІБРИДНИЙ МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ШТУЧНОЇ ІМУННОЇ СИСТЕМИ В СПП ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ

4.1. Удосконалений алгоритм оптимізації HINO-SF

Використовуючи позначення, введені в п. 1.2.2, та враховуючи недоліки розглянутих вище реалізацій алгоритмів умовної та безумовної оптимізації на основі методу моделювання штучних імунних систем, пропонується наступний алгоритм, що має ряд переваг, запозичених у інших пошукових алгоритмів, зокрема генетичних та меметичних [130]:

- не потребує двійкового кодування дійсних змінних;
- передбачає обмін інформацією між пошуковими агентами;
- дозволяє гнучко враховувати пристосованість пошукових агентів при формуванні нового покоління;
- дозволяє агенту застосовувати обмежений локальний пошук.

Метою запропонованого алгоритму останніх має стати ефективний пошук сімейства рішень задачі умовної оптимізації у безперервному або дійсному просторі в реальному масштабі часу з якомога повнішим вивченням всієї області пошуку.

Назвемо запропонований алгоритм HINO-SF (Hybrid Immune Network Optimization algorithm with Saaty selection and Fibonacci search), синтез якого докладно розглянуто в [131]. Він складається з наступних кроків:

Крок 1. Задається критерій зупинки (зазвичай абсолютний час або кількість поколінь-ітерацій). Випадково генерується популяція антитіл. Лічильник поколінь встановлюється в $t = 0$.

Крок 2. Якщо досягнуто наперед заданий критерій, здійснюється перехід до кроку 11; в іншому випадку – перехід до кроку 3.

Крок 3. За оцінкою пристосованості клітин поточного покоління призначається кількість клонів для кожної з клітин поточного покоління – оператор селекції.

Крок 4. Клонування клітин у кількості, що визначена оператором селекції.

Крок 5. Рекомбінація клонованих особин за допомогою оператора ймовірнісного кросинговеру.

Крок 6. Розрахунок динамічної ймовірності мутації для клонів та виконання адаптивного оператора мутацій.

Крок 7. З певною ймовірністю виконання для кожного клона оператору одновимірного локального пошуку за випадковою координатою методом золотого перетину (Фібоначчі) [132].

Крок 8. Стиснення спільної популяції батьків та клонів за рахунок відповідного оператора до заданого рівня N_p .

Крок 9. Знищення з поточного покоління клітин, вік яких досяг заданого значення t_{max} . Їх місце в основній популяції займають клітини, згенеровані випадкових чином в області пошуку.

Крок 10. Лічильник поколінь $t = t + 1$. Перехід на крок 2.

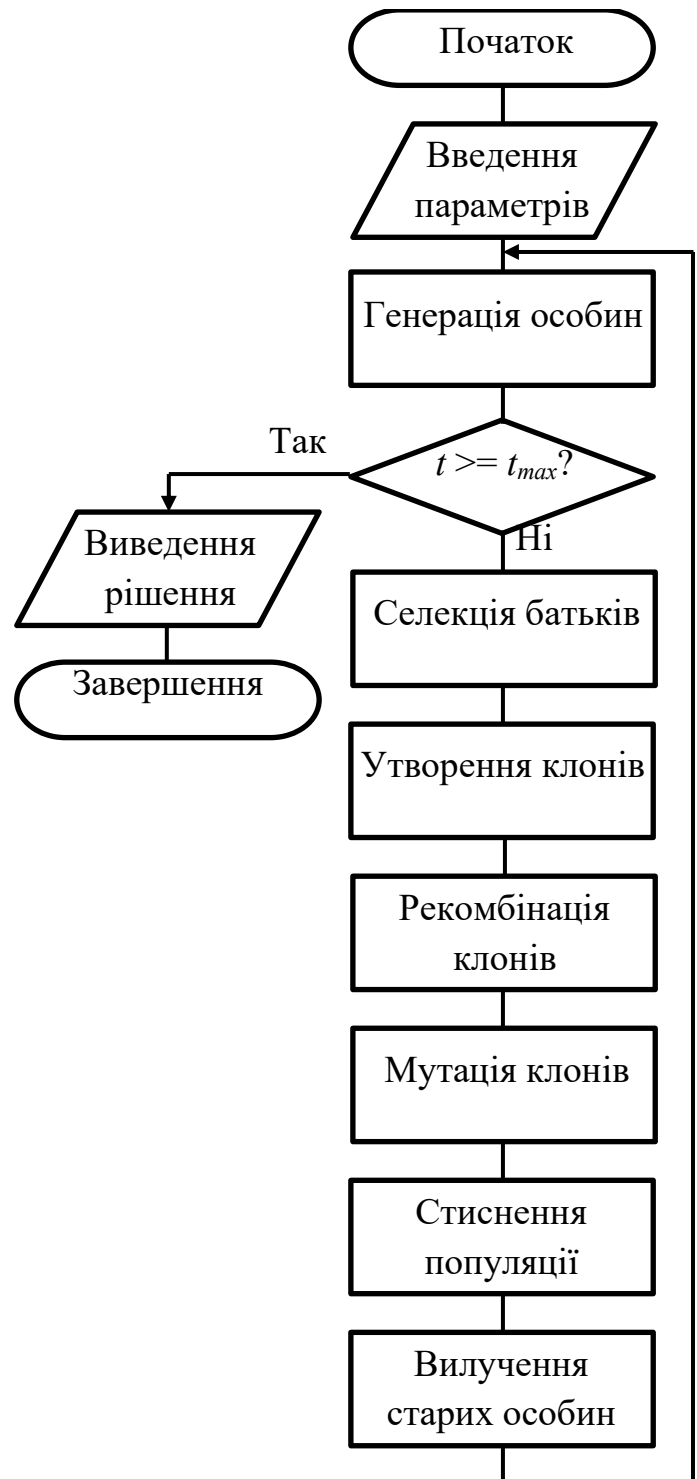


Рис. 4.1 – Блок-схема алгоритму HINO-SF

Крок 11. Виведення поточного покоління, як множини субоптимальних рішень.

Крок 12. Зупинка алгоритму.

Викладений алгоритм ілюструє блок-схема, наведена на рисунку 4.1. Зазначений алгоритм оптимізації гібридної імунної мережі може використовуватись для розв'язування як задач у нескінченному просторі, так і задач комбінаторного типу. Остання детально описана за [133]. Це задача планування виконання замовлень, що реалізується металургійним підприємством, яка, як правило, належить до класу задач комбінаторної оптимізації теорії планування. При цьому задача планування виконання замовлень характеризується ознаками іншої відомої комбінаторної задачі - побудови маршруту комівояжера (задача комівояжера, TSP), зокрема, відкритої задачі комівояжера.

Інша комбінаторна прикладна оптимізаційна задача — це задача мінімізації кількості сталі, яка забезпечує обмеження розміру замовлення на сталь лише для одного відливного об'єму [134]. Розроблена модель визначає можливість попередньої оцінки оптимального розміру заготовки, виходячи з необхідного розкрою по довжині кінцевого виробу, що відповідає певній формі перерізу заготовки, та обмеження ваги зливків у верхній і нижній частині.

Розглянемо кожен зі згаданих в алгоритмі операторів докладніше.

4.1.1. Застосування квазі-випадкових генераторів антитіл

У будь-якому алгоритмі глобальної оптимізації на основі популяції, як-от оптимізація роєм часток (PSO), еволюційна стратегія (ES), генетичний алгоритм (GA) або ШПС, що розглядаються нами, для створення вибірки N_{pop} особин початкового покоління, а також для генерації нових пошукових агентів замість тих, хто вибув, використовується так званий генератор псевдовипадкових чисел,

що імітує реалізацію розподілу $U(0; 1)$. Якщо його потужність генерації N менша за $10^3 - 10^4$, це призводить до занадто неоднорідної сітки [135].

Пропонується в операторі генерації особин замість генератора псевдовипадкових чисел застосовувати квазі-випадкові числа, які мають кращу однорідність, ніж псевдовипадкові числа. Квазі-випадкові числа мають багато подібності з псевдовипадковими числами, але вони вибираються детерміновано на основі послідовностей з низькою розбіжністю [136].

Послідовність Халтона і набір Хаммерслі визначають два детермінованих способи формування вибірки у багатовимірному дійсному просторі таким чином, щоб отримані точки були якомога далі одна від одної. По суті, послідовність Халтона і множина Хаммерслі є узагальненням послідовності Ван дер Корпута для багатовимірних випадків.

Послідовність Соболя є ще одним широко використовуваним генератором квазі-випадкових чисел. Він був винайдений Іллею Соболем ще в 1967 році. Цей генератор квазі-випадкових чисел використовує базу 2 для генерації рівномірного розподілу $U(0; 1)$, щоб потім виконати спеціальне перевпорядкування головної послідовності для кожного з вимірів вибіркового гіперпростору [137].

На рисунку 4.2 показано порівняння 1000 точок у 2-вимірному дійсному просторі з псевдовипадкової вибірки на основі генератора «вихор Мерсенна», стандартного для більшості сучасних мов програмування (угорі ліворуч), із послідовністю Халтона (вгорі праворуч), з набором Хаммерслі (унизу зліва) та з послідовністю Соболя (унизу справа). Як видно з ілюстрації, квазі-випадкові послідовності охоплюють одиничний дійсний простір більш рівномірно, ніж псевдовипадкові.

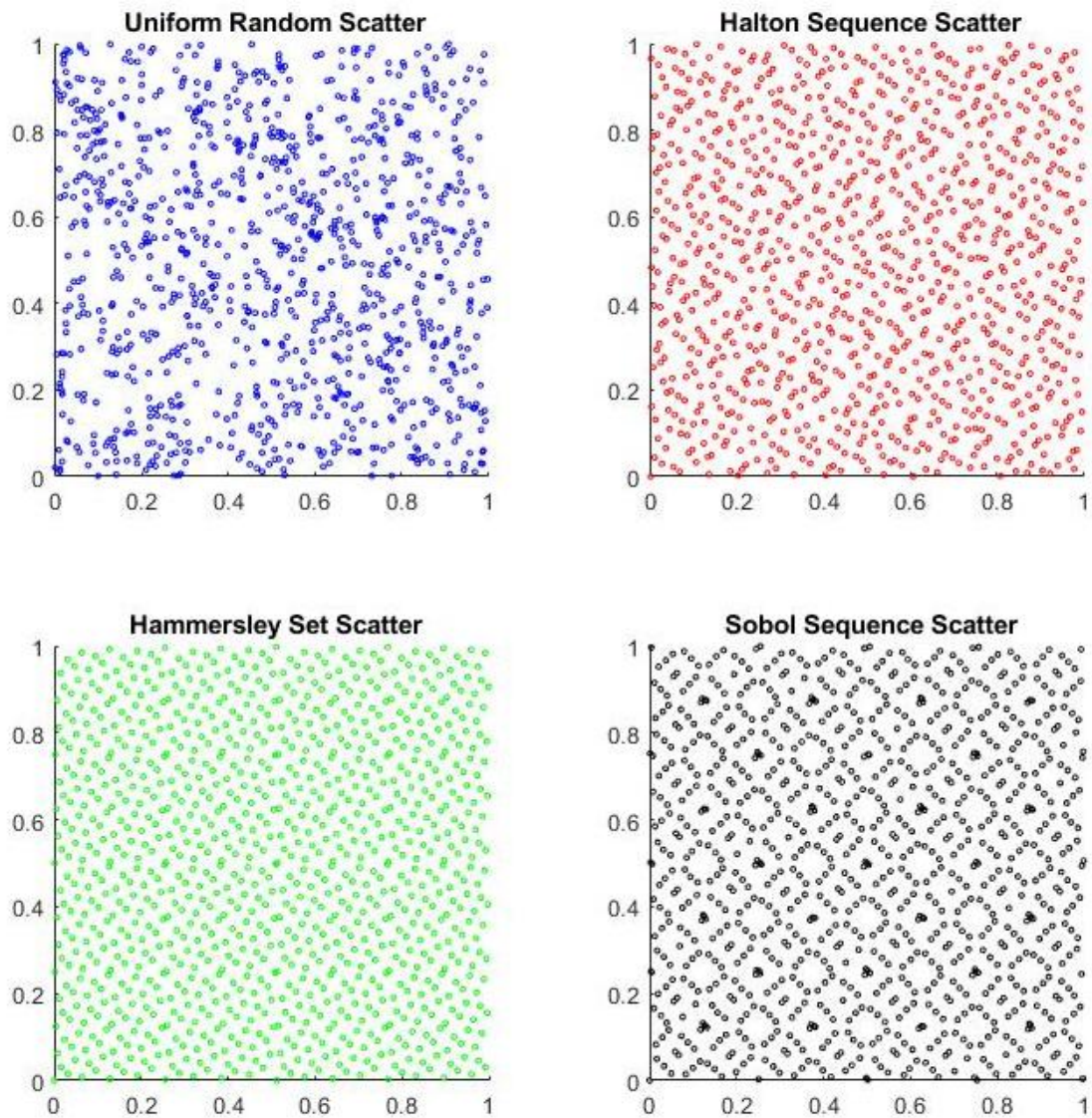


Рис. 4.2 – Порівняння псевдовипадкових (ліворуч угорі) і квазі-випадкових генераторів у двовимірному просторі

Щоб проілюструвати ефект, який має для розв'язання багатовимірних оптимізаційних задач еволюційними методами ефективність оператора генерації випадкових особин, був проведений математичний експеримент. За допомогою викладеного вище алгоритму HINO-SF вирішувалась задача Растрігіна у багатовимірному неперервному просторі [78] та комбінаторна задача мінімального покриття множини *scrcus07* з набору тестових функцій OR-Library (розмірність – сотні вершин) [138]. При цьому для порівняння використовувалися вбудовані в систему MATLAB класичні генератори.

Результати порівняння на перших 10 000 ітераціях ілюструються даними в таблиці 4.1 та графіками на рисунку 4.3.

Таблиця 4.1 містить порівняння згаданих вище псевдовипадкових і квазі-випадкових генераторів для розв'язування задачі Растрігіна в 10, 25, 65 і 100 вимірному безперервному просторі. Генератори порівнюються за часом першого отримання наперед відомого глобального оптимуму.

Таблиця 4.1. Час до першого отримання глобального оптимуму, ітерацій

| Генератор | | Розмір простору | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------|------|-------|--------|
| | | 10 | 25 | 65 | 100 |
| псевдо-випадковий | Вихор Мерсенна (за замовчуванням) | 136 | 1702 | 10274 | 64987 |
| | Комбінований рекурсивний | 118 | 1476 | 11320 | 103951 |
| | Мультиплікація Фібоначчі | 86 | 1099 | 9920 | 68357 |
| квазі-випадковий | Послідовність Халтона | 111 | 1375 | 9811 | 61159 |
| | Набір Хаммерслі | 103 | 1258 | 8917 | 51478 |
| | Послідовність Соболя | 84 | 1005 | 8497 | 66123 |

Натомість цього на рисунку 4.3 показана часова залежність найкращого рішення розв'язку задачі покриття множин для перших 10 000 ітерацій.

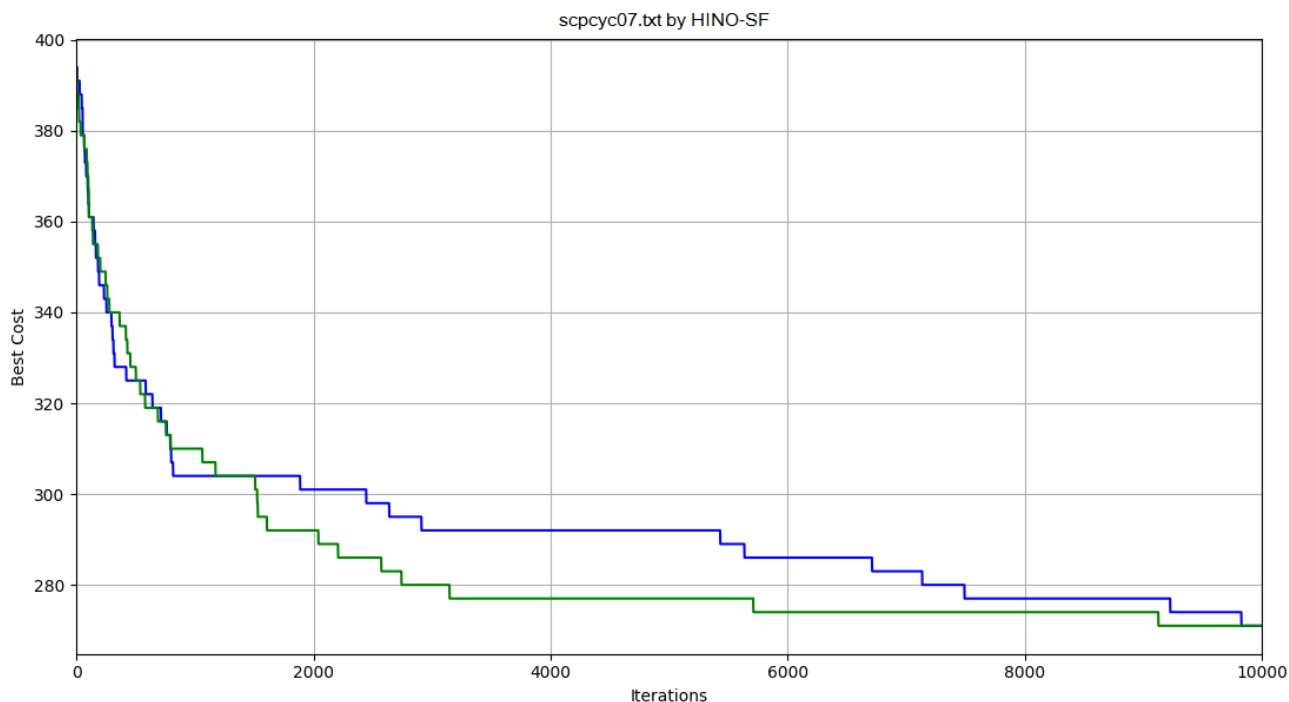


Рис. 4.3 – Найкраще рішення задачі покриття множин на перших 10 000 ітерацій

Як можна зробити висновок з результатів у таблиці 4.1, при розв'язанні багатовимірних задач в дійсному просторі усі квазі-випадкові генератори показують кращий результат, ніж псевдовипадкові генератори. Цей результат підтверджується і стає особливо помітним при збільшенні розмірності задачі, коли заповнення простору рішення стає важливим фактором відшукування глобального оптимуму.

Як можна побачити з рисунка 4.3, застосування квазі-випадкових генераторів при довготривалій роботі евристичного алгоритму забезпечують те ж саме підсумкове рішення, що і використання псевдовипадкових генераторів. Втім, використання квазі-випадкових генераторів прискорює пошук глобального оптимуму в середньому на 12-20% часу, що може бути важливим при розв'язанні задач оптимізації виробничих процесів, зокрема розливки сталі, розкроювання полоси та інших, виконуваних з обмеженням на час.

4.1.2. Оператор селекції на основі парних порівнянь рішень

Одним з основних факторів, що визначають ефективність алгоритму оптимізації, заснованого на штучній імунній системі, є вибір батьківських особин, які використовуються для отримання клонів. У [131] пропонується використовувати оператор вибору на основі попарних порівнянь Сааті. У цьому випадку матриця кандидатів попарних порівнянь для нащадків заповнювалася лише для рішень, які входять до першої половини відрізка значень цільової функції $[\varphi_{best}; \varphi_{worst}]$ для рішень-кандидатів. Рейтинг кожного з кандидатів j розраховується за

$$a_j = 1 + [\varphi(X_j) \cdot k], \quad (4.1)$$

де k - розмірність шкали (за замовчуванням $k = 9$).

Побудова матриці попарних порівнянь, для першого рядка якої використовується вираз $b_{1i} = a_1/a_i$, а для решти - $b_{ij} = b_{1j}/b_{1i}$.

Аналіз ефективності застосування алгоритму HINO-SF з описаним оператором селекції для розв'язання задач в дійсному і комбінаторному просторі показав певні недоліки такого підходу. По-перше, при невеликій кількості пошукових агентів доволі типовою є ситуація передчасної збіжності, коли фактично наступне покоління формується з одного або двох потенційних батьків, адже решта лежать за серединою відрізка $[\varphi_{best}; \varphi_{worst}]$. По-друге, і це наслідок першої проблеми, оскільки більшість клонів будуть нащадками одного чи двох представників попереднього покоління, зникає один факторів з переваги стратегії ШС – мультиагентність, тобто одночасність пошуку рішення кількома агентами в різних частинах області пошуку.

Задня уникнення викладених недоліків пропонується використання модифікованого оператора селекції, заснованого на методі попарних порівнянь Сааті, також описаному в [139]. Матриця парних порівнянь заснована на наступному принципі:

$$b_{ji} = \begin{cases} |a_j - a_i| + 1, & \text{if } a_j \geq a_i, \\ \frac{1}{b_{ji}}, & \text{if } a_j < a_i. \end{cases} \quad (4.2)$$

Розрахунок функції належності виглядає так:

$$\mu(\varphi(X_i)) = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ji}} / \sum_{i=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ji}} \right). \quad (4.3)$$

На відміну від відомих раніше реалізацій [131, 139] пропонується зняти обмеження на пристосованість пошукового агента як умову виступати батьком для клонів наступного покоління. Особини, що набирають за (4.3) навіть мінімальні бали як оцінку своєї пристосованості, мають право мати нащадків з такою ймовірністю.

Ефективність запропонованого рішення була перевірена на тестових задачах. Для порівняння всі тестові задачі такої ж розмірності вирішувались також з використанням інших операторів селекції з доведеної ефективністю [140], зокрема рангового (порядкового) та турнірного (вибір за принципом

рулетки). Порівняння модифікованого оператора селекції з конкуруючими ілюструють дані в таблиці 4.2. У цій таблиці оператори вибору порівнюються за двома основними показниками: кількістю ітерацій (поколінь) до першого знаходження глобального оптимуму та кількістю викликів цільової функції. Обидва значення обчислені усереднено за 10 запусків з різними випадковими початковими умовами. В ході експерименту розглянуті як комбінаторні, так і неперервні задачі різної розмірності.

Таблиці 4.2 – Залежність швидкості збіжності алгоритму HINO-SF залежно від оператора селекції

| Задача | ↓ Розмірність Селектор → | Кількість ітерацій | | | | Кількість викликів цільової функції | | | |
|------------|--------------------------------|--------------------|------------|-------|-------------|-------------------------------------|--------------|--------|--------------|
| | | Ранговий | Турнірний | Сааті | Сааті мод. | Ранговий | Турнірний | Сааті | Сааті мод. |
| Наплічник | 1000 | 126 | 105 | 256 | 97 | 14015 | 11505 | 29711 | 10095 |
| MinTree | 100 | 536 | 455 | 450 | 143 | 59935 | 52869 | 53159 | 14865 |
| SetCovP | 672 | 829 | 746 | 758 | 807 | 87544 | 81991 | 82634 | 83505 |
| Растрігіна | 100 | 8426 | 7913 | 9510 | 6374 | 101206 | 88725 | 108462 | 78124 |
| Еклі | 25 | 889 | 849 | 1024 | 765 | 45873 | 44562 | 51268 | 36630 |
| Розенброка | 2 | 104 | 80 | 105 | 91 | 2518 | 1998 | 2478 | 2235 |

За результатами, наведеними в таблиці 4.2, в можна зробити наступні висновки:

1) запропонований модифікований оператор селекції на основі методу парних порівнянь шкали Сааті однаково ефективний як у двійковому, так і в безперервному просторі;

2) у деяких задачах (побудова мінімального кістякового дерева, функція Еклі) запропонований модифікований селектор показує вищу ефективність за решту конкурентів у 1,5 - 3 рази).

3) в більшості задач, особливо невеликої розмірності запропонований модифікований селектор показує результат, що є кращим чи близький до кращого за кількістю ітерацій та кількістю звернень до цільової функції.

З урахуванням викладеного надалі пропонується застосовувати у оптимізаційному алгоритмі моделювання штучної імунної системи модифікований варіант оператора селекції для всіх особин поточного покоління без виключення із застосуванням для оцінки ймовірності мати нащадків розрахункових формул (4.2)-(4.3).

Модифікований оператор селекції за методом парних порівнянь Сааті є однією з ключових відмінностей запропонованого алгоритму від решти відомих реалізацій підходу на основі моделювання ШС, у яких застосовується турнірний, пропорційний або ранговий оператор розподілу кількості клонів між батьківськими особинами. Крім того, що даний оператор селекції, на відміну від решти, є математично обґрунтованим, його практичне застосування забезпечує кращу збіжність при вирішенні типових задач у порівнянні з іншими операторами селекції.

4.1.3. Кросинговер як засіб обміну інформацією

Іншою ключовою відмінністю запропонованого алгоритму є застосування до клонів адаптивного оператора кросинговеру, що передбачає обмін генетичною інформацією. Саме кросинговер дозволяє ідентифікувати запропонований алгоритм як мережевий, адже пошукові агенти не просто обстежують область пошуку в околі свого попереднього положення, а й обмінюються інформацією на рівні генів, диверсифікуючи цей пошук на відрізку простору між різними особинами. Основа задача оператора кросинговера – урізноманітнити області пошуку найкращого рішення в алгоритмі з метою якнайскорішого відшукування глобального оптимуму. Відтак. Оцінка ефективності оператора кросинговера буде здійснюватись за кількістю ітерацій витрачених на знаходження глобального оптимуму з певною точністю, а також

за самою цією точністю як середньою відстанню до наперед відомого рішення після декількох запусків за однакових початкових умов.

Вибір типу кросинговера залежить від простору, в якому він застосовується. Для тестових задач в багатовимірному дійсному просторі порівнювалися варіанти застосування таких операторів кросинговера: прямий, рівномірний, лінійний, арифметичний, евристичний, Лапласа та SBX [140]. Комбінаторні задачі розв'язувалися за допомогою підходів, які відрізняються від тих, що застосовуються до розв'язку неперервних задач, і будуть розглянуті нижче.

В математичному експерименті розв'язувались ряд задач з кількістю вимірів 2, 10, 25, 65 та 100. При цьому залишалися постійними решта налаштувань алгоритму HINO-SF такі як розмір батьківської популяції N_{pop} , кількість нащадків N_c , рівень мутації $mutLevel$ (буде описаний далі). В якості оператора селекції був застосований модифікований оператор на основі парних порівнянь Сааті.

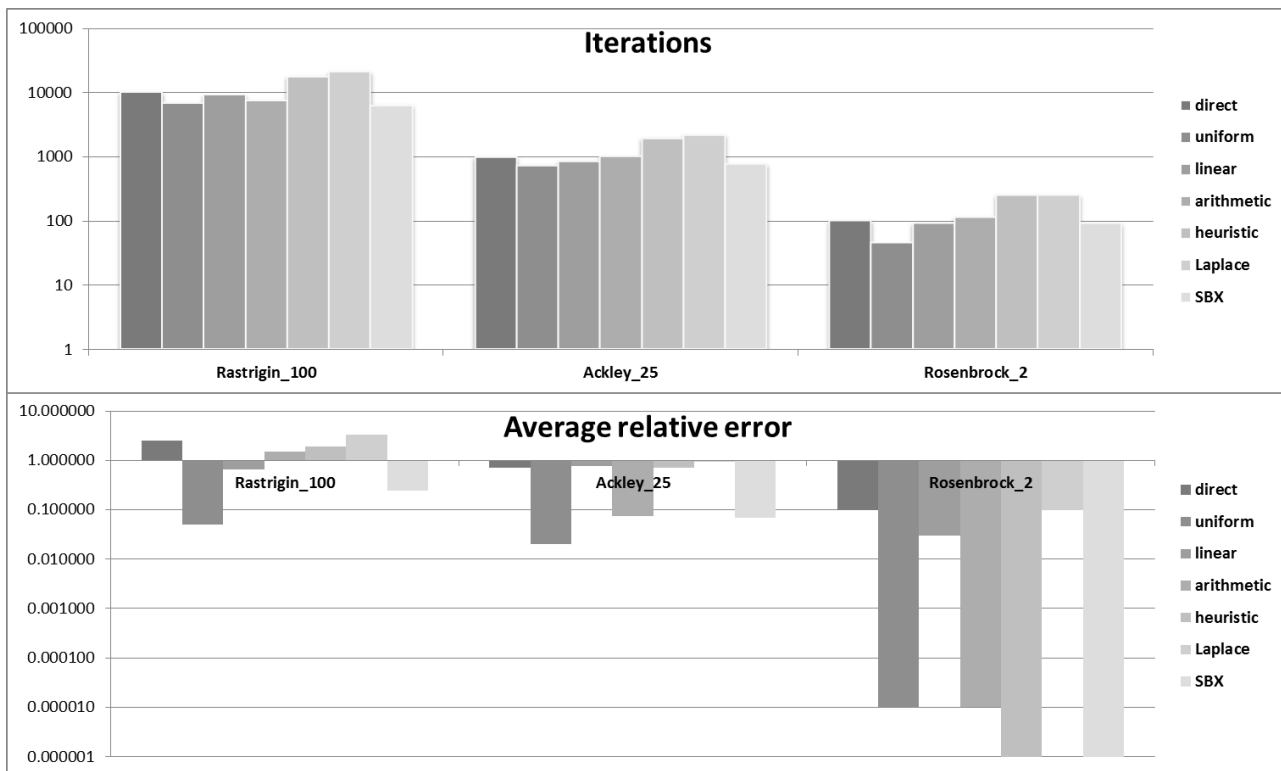


Рис. 4.4 – Порівняння семи кросинговерів для безперервних задач

Порівняння швидкості визначення рішення (за кількістю ітерацій) та відхилення від точного рішення показано на рисунку 4.4. Дані на малюнку усереднені для 10 запусків із випадковими початковими популяціями.

Аналіз результатів на рисунку 4.4 показує, що кросинговер Лапласа та евристичний потребують виконання у 2-2,5 рази більше ітерацій, не забезпечуючи при цьому достатньо якісного результату для різних задач різного розміру.

Прямий та лінійний кросинговери не забезпечують високої точності рішень навіть у двовимірному просторі, хоча й ефективні з точки зору кількості ітерацій.

Умовно ефективним слід вважати рівномірний та арифметичний кросинговери, які забезпечують високу точність для більшості задач, не потребуючи надмірної кількості ітерацій для пошуку околу глобального оптимуму. Саме рівномірний кросинговер, який з однаковою ймовірністю відбирає батьківські гени, привів до більш високих значень точності на великомасштабних задачах. Подібні результати були отримані раніше при дослідженні оптимальних налаштувань генетичних алгоритмів [140].

Для розмірностей 2, 10 та 25 (задача Растрігіна) високу точність показав кросинговер SBX (Simulated binary crossover) [141], який використовується в базовому алгоритмі і який найчастіше використовується в безперервному просторі. Він водночас не потребує великої кількості ітерацій для попадання в окіл глобального оптимуму.

Відомою перевагою оператора SBX-кросинговера є відсутність вимоги кодувати дійсні координати пошукових агентів в двійкову форму, при цьому забезпечуючи імунним клітинам можливість виконувати склеювання векторів дійсних координат аналогічно двійковим векторам в генетичних алгоритмах.

Оператор SBX передбачає три параметри, що задаються користувачем:

– P_{cross} – ймовірність, що для поточної пари клонів буде виконано оператор кросинговеру;

– P_{ind} – ймовірність того, що по даній координаті виконуватиметься схрещування;

– індекс варіації η – показує, як сильно нащадок схрещування має бути схожий на окремого батька.

Оператор складається з трьох кроків:

Крок 1. Перевірка участі в клонуванні: якщо випадкове число, рівномірно розподілене між 0 та 1 (тут і надалі позначаємо $U(0;1)$) менше ймовірності P_{cross} для двох випадкових клонів з номерами j та k , починається перехід на крок 2, інакше клони j та k залишаються без обміну генами.

Крок 2. Для кожної координати – перевірка чи інше випадкове число $U(0;1)$ менше P_{ind} . Якщо так – крок 3, інакше – перехід до іншої координати.

Крок 3. Схрещування відбувається за відомою формулою, справедливою для більшості кросинговерів у дійсному просторі

$$\begin{cases} x'_{j,i} = \frac{1}{2} \left((1 + \beta)x_{j,i} + (1 - \beta)x_{k,i} \right) \\ x'_{k,i} = \frac{1}{2} \left((1 + \beta)x_{k,i} + (1 - \beta)x_{j,i} \right) \end{cases}, \quad (4.4)$$

де $x_{j,i}$ – значення i – того гену j – того батьківського клона; $x_{k,i}$ – аналогічно для k – того батьківського клона; $x'_{j,i}$ та $x'_{k,i}$ – відповідні значення для клонів-нащадків; β – так званий ступінь схрещування, що обчислюється за формулою

$$\beta = \begin{cases} [2 \cdot U(0;1)]^{1/\eta}, & \text{if } U(0;1) \leq \frac{1}{2}; \\ \left(\frac{1}{2[1 - U(0;1)]} \right)^{1/\eta}, & \text{if } U(0;1) > \frac{1}{2} \end{cases}. \quad (4.5)$$

Індекс варіації η є параметром алгоритму і визначає, наскільки сильно нащадки будуть схожі на своїх батьків. Зазвичай [142] η приймає значення від 1 (нащадки можуть значно відрізнятись від батьків) до 5 (нащадки майже точно повторюють батьківські особини). При $\eta = 0$ даний кросинговер перетворюється на рівномірний, коли нащадки можуть по кожній координаті отримувати

значення що рівномірно розподілене вздовж відрізка, який поєднує координати батьківських особин.

З метою пошуку найкращих налаштувань оператора кросинговера була проведена серія експериментів на тестових задачах з різними комбінаціями налаштувань P_{cross} , P_{ind} та η . Надалі для практичної реалізації застосовуємо наступні рекомендації:

- ймовірність застосування кросинговера до пари батьків P_{cross} обирати в межах 0,2...0,6, причому зі зростанням розмірності ця ймовірність має збільшуватись;
- ймовірність того, що певний ген має обмінюватись P_{ind} обирати в межах 0,4...0,9, причому зі зростанням розмірності ця ймовірність має збільшуватись;
- індекс варіації η має плавно зростати від 1 до 5 за очікуваний час роботи алгоритму.

Враховуючи все викладене, для вирішення практичних задач надалі пропонується використовувати рівномірний кросинговер для вирішення задач у багатовимірному просторі, та кросинговер SBX з описаними налаштуваннями для задач малої і середньої розмірності, оскільки він потребує більшого числа обчислень.

4.1.4. Мутація як механізм інтенсифікації і диверсифікації

Головним оператором, що відповідає за пошук рішення, в запропонованому алгоритмі, як і в більшості реалізацій методу штучних імунних систем, залишається оператор мутації. Пропонується адаптивний оператор, який випадковим чином застосовує або так звану «вузьку» мутацію з метою інтенсифікації пошуку в околі поточного рішення, або так звану «широку» мутацію для диверсифікації області пошуку. Як і у випадку оператора схрещування, форма оператора мутації істотно залежить від простору, де вирішується задача.

Вибір для поточного клона діапазону мутацій («широка» чи «вузька») ґрунтується на оцінці функції корисності його батьківської особини відносно корисності інших пошукових агентів в популяції та залежно від номеру ітерації. Граничну мову визначає число

$$mutSelect_j = \left(1 - \gamma \frac{t}{T_{max}}\right) \frac{\varphi_{max} - \varphi_j}{\varphi_{max} - \varphi_{min}}, \quad j = [1:N_c], \quad (4.6)$$

де j – номер клона у популяції нащадків; N_c – розмір популяції клонів; t – поточний номер ітерації; T_{max} – прогнозована максимальна кількість ітерацій; φ_{max} – найгірше значення цільової функції в поколінні батьків; φ_{min} – найкраще значення цільової функції в тому ж поколінні; φ_j – значення цільової функції для поточного клона; γ – максимально допустима частка широких мутацій у загальній кількості.

Якщо при зверненні до клона j випадкове значення $U(0; 1)$ виявиться менше, ніж гранична умова $mutSelect_j$ за (4.6), для нього виконується «вузька» мутація (пошук в околі рішення). В іншому випадку – виконується «широка» мутація (перехід до нової області пошуку). Для безперервного простору пропонується використовувати комбінацію «широкої» мутації Гаусса та «вузької» мутації з використанням поліноміального розподілу. Обидві докладно описані в [131].

В якості «широкої» мутації пропонується застосування додавання до поточної координати i клона j випадкової складової, розподіленої за законом Гаусса з математичним очікуванням 0 і середнім квадратичним відхиленням δ_i :

$$x_{j,i}^C = x_{j,i} + N(0; \delta_0), \quad i = [1:n]. \quad (4.7)$$

При цьому випадкова складова δ_0 не змінюється під час роботи алгоритму і повинна бути достатньо великою, аби охопити можливий діапазон знаходження глобального оптимуму. В задачах умовної оптимізації δ_0 раціонально обирати як половину області припустимих значень за виміром i .

В якості «вузької» мутації пропонується застосування додавання до поточної координати i клона j випадкової складової, розподіленої за поліноміальним законом з використанням формули

$$x_{j,i}^C = x_{j,i} + \delta_i \sqrt{\frac{2}{1+t}}, \quad i = [1:n]. \quad (4.8)$$

де t – номер ітерації; δ_i – випадкова складова, що залежить від положення клона в просторі пошуку відносно всієї популяції за виміром i

$$\delta_i = \begin{cases} \left(2 \cdot r_i + (1 - 2r_i) \Delta_i^{\mu+1}\right)^{\frac{1}{\mu+1}} - 1, & \text{if } r_i < \frac{1}{2}; \\ 1 - \left(2 \cdot (1 - r_i) + 2(r_i - 0,5) \Delta_i^{\mu+1}\right)^{\frac{1}{\mu+1}}, & \text{if } r_i \geq \frac{1}{2} \end{cases}. \quad (4.9)$$

де $r_i = U(0;1)$ – випадкове число, рівномірно розподілене від 0 до 1 (генерується

окремо для кожної з координат); $\Delta_i = \frac{\max\{x_{\max,i} - x_{j,i}; x_{j,i} - x_{\min,i}\}}{x_{\max,i} - x_{\min,i}}$ – відносне

положення поточної клітини в області пошуку по i -тій координаті; μ – показник щільності поліноміального розподілу (більші значення відповідають меншому розсіву мутації).

В ході дослідження на тестових задачах було виявлено, що частка «широких» мутацій γ , що входить до виразу (4.6), на рівні 0,1...0,25 ефективна для розв'язання задач низької розмірності але повинна збільшуватись до 0,8...0,9 для безперервних задач високої розмірності. Це пояснюється тим, що в просторі малої і середньої розмірності головним фактором цілеспрямованої мутації є врахування сусідства найкращих поточних рішень за (4.9) та поступове зменшення радіусу мутації за (4.8). Водночас при розв'язанні безперервних задач розмірністю 60 та більше вкрай важливим є якомога скоріший пошук околу глобального оптимуму, відтак саме широка мутація має значний вплив на швидкість пошуку глобального оптимуму.

Проаналізувавши формулу (4.6), неважко помітити, що найкращі представники покоління на початковому етапі алгоритму схильні до вузьких

пошукових мутацій, на кінцевому – до широких. Натомість найгірші представники покоління майже завжди здійснюють лише широкі мутації.

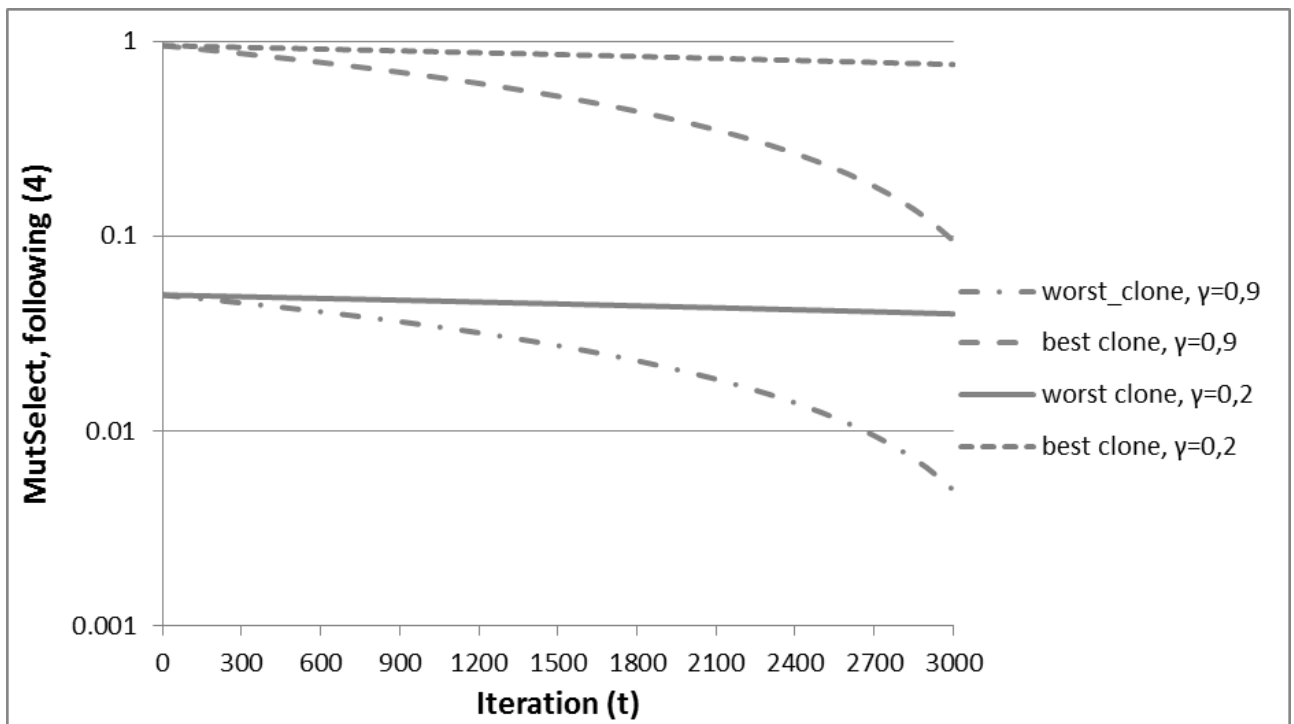


Рис. 4.5 – Залежність долі випадкових мутацій від якості клона та часу

Залежність $mutSelect_j$ характеристики від поточного числа ітерацій, ступеня адаптивності клону та допустимої максимальної частки широких мутацій ілюструє графік на рисунку 4.5. Аналізуючи отримані залежності, помітно, що при низьких значеннях γ найгірші клони в популяції майже завжди здійснюють широку мутацію, а успішні клони – вузьку. Збільшуючи розмірність, вибір природи мутації істотно змінюється. У багатовимірному безперервному просторі у випадку $\gamma = 0,9$ на початку розрахунку клони поведуться так само, як описано вище. Коли ми наближаємось до кінця розрахунку, частка вузьких мутацій зменшується навіть для найкращого з клонів у 10 разів.

Слід звернути увагу, що вибір типу мутації здійснюється для всієї клітини, після чого для кожної з координат застосовується або (4.7), або (4.8) з урахуванням (4.9).

4.1.5. Адаптивний оператор стиснення популяції

Оператор стиснення популяції визначає успіх пошуку рішень у парадигмі штучних імунних систем. Він запобігає передчасній збіжності рішень та зупинці в локальних оптимумах, що властиво всім еволюційним алгоритмам. Робота оператора стиснення полягає у наступному. По закінченні усіх пошукових операторів клітини нового покоління оцінюються за якістю. Разом з попереднім поколінням вони утворюють конфліктну множину, з якої відбирають N_p клітин з найкращою афінністю, що лежать не ближче, ніж у радіусі r одна від одної. Для цього виконуються наступні операції:

- сортування клонів та батьків за зменшенням афінності;
- циклічно від першої клітини до спустошення множини ще не розглянутих:
 - вилучення усіх клітин, близьких до поточної і гірших за неї.

У більшості джерел [131, 143, 144] емпірично визначається так званий радіус подібності особин, який визначає мінімальну відстань у просторі розв'язків між особинами, що переходять з покоління в покоління. Більшість авторів визначають його як константу, або як величину, яка рівномірно зменшується. Пропонується пов'язувати радіус подібності з радіусом мутації клонів в поточному поколінні $\delta_i(t)$. Таким чином, радіус мутації на поточній ітерації для кожного пошукового агента розділяє простір пошуку рішення на «внутрішню область» або ж окіл, в якому за пошук оптимуму відповідає мутація, та «зовнішній простір», якому належать інші пошукові агенти. Це забезпечує різноманітність у кожному з поколінь.

Експериментально при вирішенні ряду тестових задач у безперервному просторі, було виявлено, що ефективне значення радіусу подібності оператора стиснення зростає зі збільшенням розмірності задачі. Під ефективним значенням слід розуміти таке налаштування оператора стиснення, за якого досягається максимальна швидкість досягнення глобального оптимуму. Згадана залежність радіусу стиснення від розмірності простору є нелінійною і для задачі Растрігіна

ілюструється рисунком 4.6. Для інших тестових задач характер залежності схожий і докладно описаний в [145]

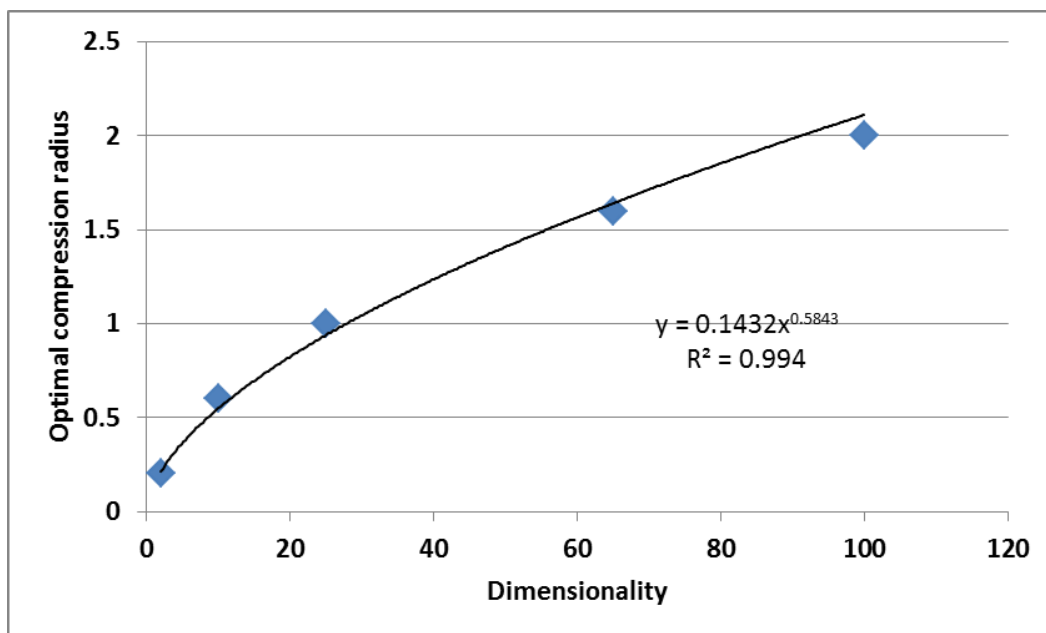


Рис. 4.6 – Залежність ефективного значення радіусу оператора стиснення від мірності простору

Також на рисунку 4.6 наведено найкращу з кількох десятків регресійних моделей, якими можна апроксимувати залежність радіуса подібності оператора стиснення від розмірності простору. Ця модель є ступеневою з показником ступеня $\frac{1}{2}$. Тому можна вважати, що шукана залежність має вигляд

$$R(n) = a_0 \sqrt[2]{n}, \quad (4.10)$$

де n – розмірність задачі в безперервному просторі; a_0 – коефіцієнт пропорційності, що пов'язує радіус подібності з радіусом мутації та кількістю пошукових агентів.

Враховуючи вирази (4.8) та (4.9) та рівномірний розподіл $r_i = U(0;1)$, а також те, що максимальна мутація здійснюється для клітин, що лежать в центрі області пошуку, для яких $\Delta_i = 0,5$, отримуємо вираз для адаптивного радіусу стиснення популяції

$$R(n,t) = \frac{1}{2N_{pop}} \sqrt{\frac{2}{1+t}} \sqrt{n} = \frac{1}{N_{pop}} \sqrt{\frac{n}{2(1+t)}}. \quad (4.11)$$

Таким чином, далі рекомендується в операторі стиснення популяції встановлювати радіус пропорційним кореню відношення мірності простору до подвоєного номера ітерації та обернено пропорційний кількості особин популяції.

4.1.6. Застосування локального пошуку

Аби інтенсифікувати пошук рішення в околі поточного розташування пошукового агента і зробити його ще більш цілеспрямованим, до клона крім можливих операторів кросингвера і мутації з певною невисокою ймовірністю P_{ls} пропонується застосовувати оператор одновимірного локального пошуку методом золотого перетину (Фібоначчі), який складається з наступних операцій:

- рівноймовірно обирається одна з координат $k = [1 : n]$;
- рівноймовірно обирається напрямок пошуку – до нижньої границі області пошуку $\min X_j^{C_i}$ чи верхньої $\max X_j^{C_i}$;
- здійснюється одновимірний локальний пошук у напрямку від поточного розташування клона у просторі $X_j^{C_i}$ до границі області пошуку.

Якщо пошук покращує афінність рішення, знайдене рішення зберігається.

Хоча традиційно [141] вважається, що оператор локального пошуку на властивий таким евристичним парадигмам, як штучні імунні системи, оскільки він змушує багаторазово звертатись до цільової функції, тим самим уповільнюючи пошуковий процес, в ряді випадків обмежений локальний пошук стає важливим засобом інтенсифікації, особливо при застряганні популяції в локальних оптимумах.

Метод Фібоначчі не є цілеспрямованим від так програє у швидкості квази-ньютонівським методам. Водночас цей метод нульового порядку не потребує взяття першої і другої похідних цільової функції, відтак може застосовуватись до будь-яких цільових функцій, в тому числі не опуклих, розривних, тощо.

Аби зберегти баланс між обчислювальною швидкістю та досягнутою точністю експериментально встановлено, що на розглянутих багато екстремальних задачах у просторі з мірністю від 2 до 100 оператор локального пошуку повинен застосовуватися до клонів з ймовірністю не вище $P_{ls} = 0,01 \dots 0,2$. При цьому покращення знайденого рішення в поколінні скидає цю ймовірність до мінімуму, а кожна ітерація, протягом якої рішення не було покращене, збільшує вдвічі, але не вище верхньої межі. Таким чином, якщо протягом тривалого часу основні пошукові оператори кросинговеру та мутації виявляються неефективні, ймовірність локального пошуку максимальна.

4.2. Особливості застосування запропонованого алгоритму для розв'язання комбінаторних задач в СППР

Ключовою відмінністю розв'язання комбінаторних задач є бінарний характер змінних, що накладає суттєві відмінності на організацію операторів кросинговеру, мутації, стиснення та локального пошуку.

Традиційні оператори кросинговеру для двійкового простору (одноточковий, двохточковий та рівномірний) описані в [146]. Для їх тестування в складі запропонованого алгоритму були розглянуті комбінаторні задачі про наплічник, про покриття множин, а також побудови мінімального кістякового дерева [101].

Порівняння швидкості знаходження рішення оптимального рішення (за кількістю ітерацій) та середнього відхилення від точного рішення (у відсотках) показано на рисунку 4.7. Результати на рис. 4.7 усереднені для 10 запусків по кожній задачі з випадковими початковими популяціями.

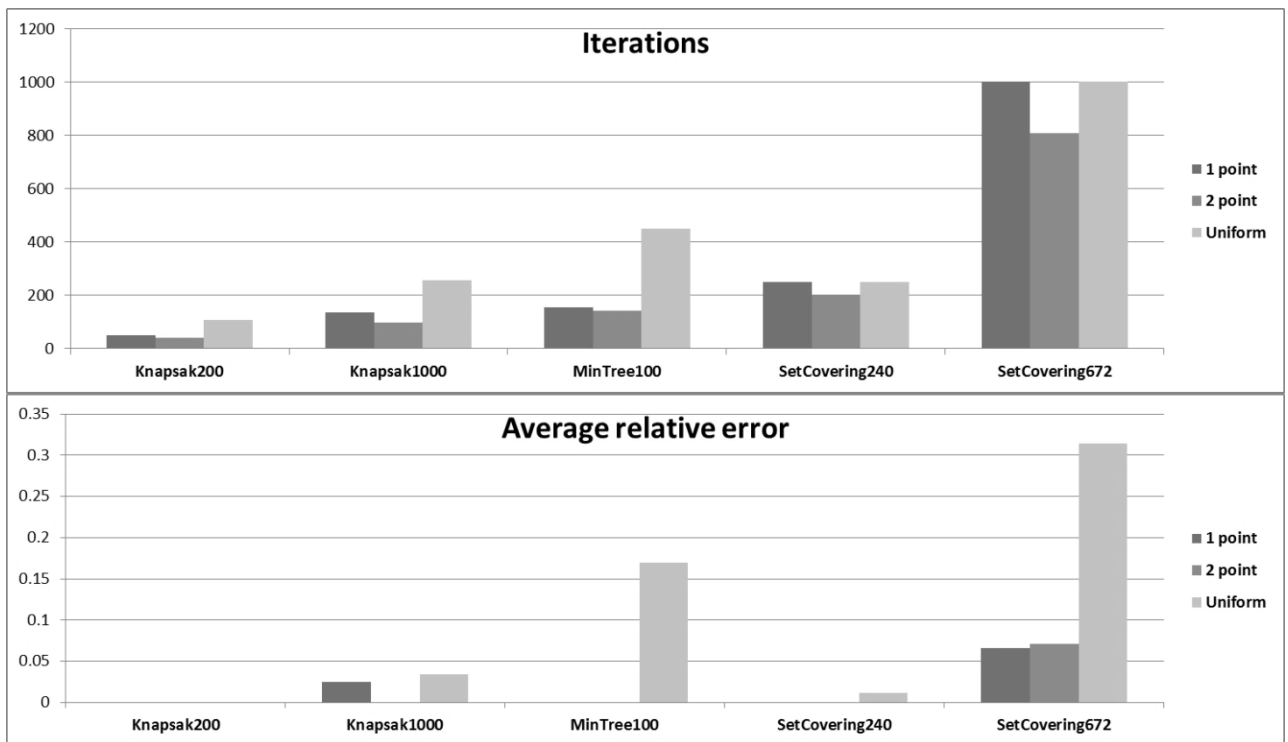


Рис. 4.7. Порівняння трьох кросинговерів для комбінаторних задач

Згідно з результатами, ілюстрованими рис. 4.7, двохточковий кросинговер виявляється найбільш ефективним при розв'язанні всіх тестових комбінаторних розв'язків задач. З одного боку, він зберігає найбільшу детальну інформацію про батьківські гени (як і односточковий кросинговер), але також забезпечує деяку диверсифікацію через два розриви в геномі. Водночас потомство, отримане з рівномірним кросинговером, істотно відрізняється від кожного з батьків за розглянутими проблемами. Клон-нащадок таким чином опиняється в абсолютно новій області пошуку, в більшості випадків виявляється набагато гіршим, ніж батьківські особини, відтак не переходить у наступне покоління.

Особливу увагу при розв'язанні комбінаторних задач слід приділяти ймовірності P_{cross} , з якою кросинговер застосовується до новоствореного клону. У широкому діапазоні від 0 до 0,9 (в задачах більшої розмірності до 0,95), вище P_{cross} значення ймовірності P_{cross} приводить до швидшого пошуку глобального оптимуму незалежно від типу проблеми. Водночас, при встановленні $P_{cross} = 1$, ефективність пошуку різко падає. Тому оператор кросинговера рекомендується використовувати з високою ймовірністю, відмінною від 1, зокрема 0,9...0,95.

Бінарні мутації, за аналогією з мутаціями у безперервному просторі, залежно від пристосованості особини, можуть бути «вузькі» та «широкі». «Вузька» мутація полягає в інверсії певної кількості випадкових генів, обраних рівноймовірно вздовж вектора-хромосоми. «Широкою» мутацією виступає сальтація, коли певна кількість генів переписується в нову область хромосоми, зберігаючи свій порядок і значення.

Основною характеристикою відмінності хромосоми нащадка від батьківської після мутації є $mLevel$ - кількість бітів, які мають інвертуватись або зсуватись одночасно в клона, який піддається мутації. Ця кількість визначається за формулою

$$mLevel = \begin{cases} mLevel_{\max} \left(1 - \frac{2t}{T_{\max}}\right) + \frac{2t \cdot mLevel_{\min}}{T_{\max}}, & \text{if } t < \frac{T_{\max}}{2}; \\ mLevel_{\min}, & \text{if } t \geq \frac{T_{\max}}{2} \end{cases}, \quad (4.12)$$

На перших ітераціях мутація має достатньо широкий діапазон $mLevel_{\max}$, рівномірно зменшуючись в першій половині роботи алгоритму до $mLevel_{\min}$, після чого залишається на незмінному низькому рівні. Величина $mLevel_{\max}$ обирається залежно від розмірності задачі і може сягати десятків бітів, але перестає забезпечувати швидку збіжність алгоритму при $mLevel_{\min}/n \geq 0,1$ (не більше 10% бітів мають інвертуватись одночасно). Величина $mLevel_{\min}$ не залежить від розмірності задачі й зазвичай приймається на рівні 1 або 2 бітів.

Різниця між «вузькою» та «широкою мутаціями» на одній й тій самій хромосомі ілюструє рисунок 4.8, де показано як змінюється геном при рівні $mLevel = 3$ біти.

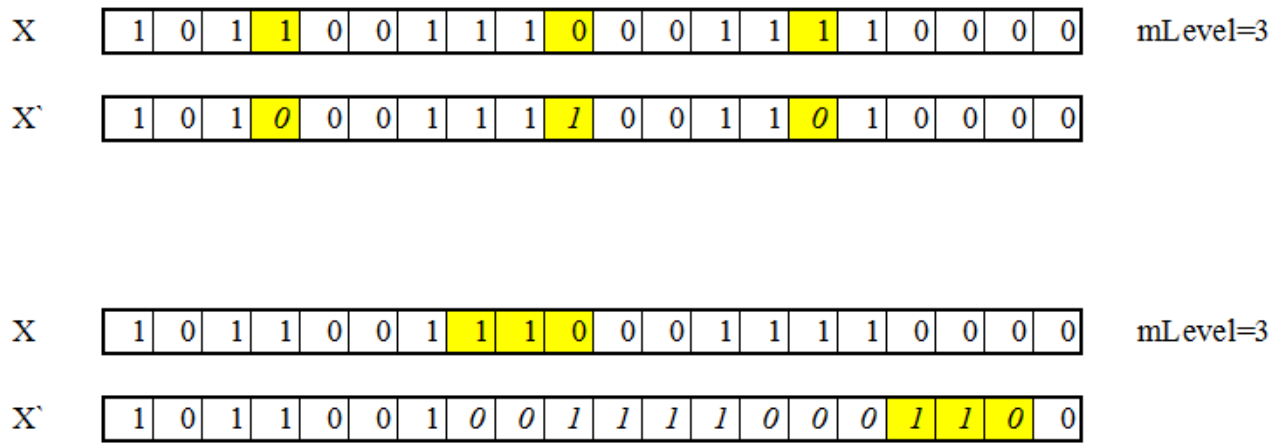


Рис. 4.8. Порівняння інверсійної та сальтаційної мутацій

Як видно з рис. 4.8, при рівні мутації 3 біти «вузька» мутація призводить до інверсії саме трьох випадкових бітів (верхній випадок), які виділені кольором і курсивом у зміненій хромосомі. Водночас сальтація (зсув трьох бітів на випадкову відстань) призводить не лише до зміни цих бітів (виділено кольором), а у й всіх бітів, які лежать в проміжку і зсуваються (виділено курсивом). Для порівняння: мутація інверсією призводить до переходу $|X - X'| = 3 = mLevel$, а мутація сальтацією до переходу $|X - X'| = d$. Прикладі $d = 10$. Теоретично $mLevel \leq d \leq n$, де n – мірність простору пошуку рішення.

З наведеного прикладу очевидно, що «широка» мутація для комбінаторного простору є оператором диверсифікації напрямку пошуку задачі. Відтак надалі рекомендується показник γ , що входить до (4.6) для комбінаторних задач приймати не вище, ніж $0,15 \dots 0,3$. Це означає, що для особин, кращих в поточному поколінні, «широка» мутація буде менш ймовірна ніж $0,15 \dots 0,3$ навіть наприкінці розрахунку і близька до 0 на його початку. Водночас ймовірність сальтації, тобто диверсифікації пошуку, пропорційно зростає до цільової функції і для найгірших у поколінні особин дорівнює 1.

4.3 Висновки до розділу 4

1. Модифікований оператор селекції на основі парних порівнянь пошукових агентів на основі оцінки придатності рішень з використанням методу ієрархії Сааті є математично обґрунтованим та відрізняється застосуванням різниці значень пристосованості замість відношення, як в аналогах, при цьому є однаково ефективним для розв'язання як комбінаторних, так і безперервних задач.

2. Адаптивний оператор кросинговеру для клітин-клонів в алгоритмі ШС на відміну від відомих забезпечує не лише диверсифікацію пошуку, а і його інтенсифікацію за рахунок застосування змінної ймовірності для кожної з координат та показника ступеня несхожості нащадків на батьків. Останній завдяки плавному збільшенню від 1 до 5 в ході пошуку рішення забезпечує поступовий перехід від рівномірної спадковості кожного з генів від того чи іншого батька до максимальної схожості на одного з батьків.

3. Адаптивний оператор мутації пошукової оптимізації, який відрізняється від відомих тим, що випадкова складова геному нащадків залежить від номеру ітерації та відносної пристосованості рішення в усій популяції використовує альтернативні види мутації для реалізації процедур інтенсифікації пошуку рішення та його диверсифікації.

4. Адаптивний оператор стиснення популяції в алгоритмі ШС має використовувати радіус подібності, пропорційний випадковій складовій оператора мутації та кореню відношення мірності простору до подвоєного номера ітерації, і обернено пропорційний кількості особин популяції. Подібні налаштування оператора стиснення підвищують ефективність пошуку глобального екстремуму за критеріями мінімуму звернень до цільової функції та мінімум ітерації до появи в множині рішень глобального оптимуму.

5. Запропонований гібридний метод оптимізації на базі штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції, забезпечує знаходження глобального оптимуму

багатовимірних задач умовної оптимізації з вищою ймовірністю, ніж у відомих еволюційних алгоритмів, що підвищує ефективність розв'язання цих задач в процесах планування та керування у виробництві прокату.

6. Запропоновані параметри операторів алгоритму дозволяють скоротити час оптимізації в 2-4 рази без втрати точності для деяких задач, що робить викладений алгоритм конкурентноздатним в порівнянні з аналогічними еволюційними підходами для вирішення комбінаторних та безперервних задач.

РОЗДІЛ 5 ІНТЕГРОВАНА СППР ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ ТА АЛГОРИТМИ РОБОТИ ЇЇ ПІДСИСТЕМ

5.1 Структура та функції інтегрованої СППР виробництва прокату

Як відзначалося в другому розділі, актуальною для металургійних підприємств з багатоетапним технологічним процесом є побудова комплексної багаторівневої системи збору даних, керування та прийняття рішень. При цьому слід розглядати різні критерії ефективності автоматизованої системи на різних рівнях: локальні для окремих технологічних операцій та глобальні для всього виробничий процес в цілому.

До глобальних критеріїв у загальному випадку слід віднести об'єм незавершеного виробництва, час виконання замовлення та витратний коефіцієнт металу. Маючи фізичну, а точніше, технологічну природу, всі ці показники носять економічний характер. Адже незавершене виробництво – це втілені у металі кошти підприємства, які мали б працювати на прибуток. Надмірний час виконання замовлення часто призводить до відмови від термінових замовлень, навіть, якщо вони економічно вигідні, а збільшений показник витратного коефіцієнту підвищує собівартість продукції.

Розглянутий в попередніх розділах технологічний процес виробництва прокатної продукції на підприємствах повного металургійного циклу можна поділити на наступні окремі процеси:

- планування виконання замовлень;
- підготовка плавки (шихтування);
- виплавка сталі (рафінація та розкислення);
- нагрівання, підготовка та розкроювання заготовок;
- прокатка та розкроювання готової продукції;
- контроль стану футеровки з прогнозуванням терміну її роботи.

Виходячи з викладеного, для підвищення техніко-економічних параметрів у багатоетапному металургійному виробництві необхідне комплексне вирішення проблеми керування організаційно-технологічними процесами плавки, нагріву, прокатки та контролю якості продукції. Підвищення ефективності виробництва може бути досягнута за рахунок контролю технологічних параметрів, залишків матеріалів на кожному переділі та стану обладнання, задіяного в усіх послідовних операцій однією інтегрованою системою підтримки прийняття рішень. Інтегрована система керування повинна працювати за узагальненим критерієм оптимальності, видаючи одночасно завдання на кожен виробничу ланку з урахуванням узгодження їх процесів. Для оптимізації керування процесами плавки, нагріву, прокатки і термічної обробки прокатної продукції з урахуванням глобального критерію потрібні сталі та надійні інформаційні зв'язки між окремими виробничими системами, що мають носити як горизонтальний характер (між підсистемами або модулями одного рівня), так і вертикальний (між модулями прийняття рішень та робочими місцями операторів окремих етапів технологічного процесу).

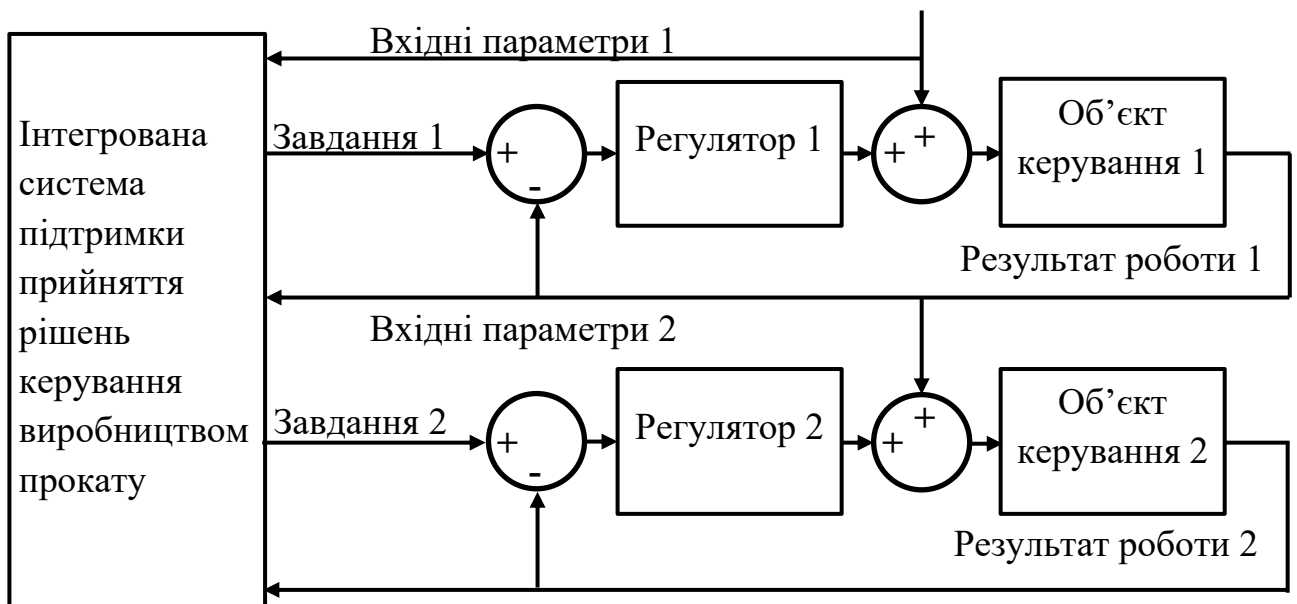


Рис. 5.1. Взаємодія окремих виробничих систем з інтегрованою СППР

Враховуючи все викладене, пропонується наступна методика взаємодії інтегрованої системи планування, контролю та керування (проектованої СППР) з виробничими системами, що ілюструється рисунком 5.1.

Саме паралельність роботи систем, а не послідовне виконання одного замовлення автоматизованими системами на різних етапах багатоетапного виробництва, дозволить значно скоротити середній час виконання одного замовлення, узгодити окремі ділянки за пропускну здатністю, зменшити кількість переналаштувань, скоротити кількість незавершеного виробництва, а отже в підсумку – скоротити собівартість продукції.

Враховуючи перелік процесів, що охоплює проектована СППР та велике коло різних джерел даних, необхідних для рішення задач відносно кожного з процесів, пропонується наступна структура автоматизованої системи підтримки прийняття рішень для керування металургійним виробництвом з конвертерним способом виготовлення сталі, яка ілюструється рисунком 5.2.

До системи включено шість різних баз даних, кожна з яких відповідає своєму підрозділу підприємства і містить дані, що генеруються чи використовуються цим підрозділом, а також сім модулів у відповідності до зазначених вище технологічних процесів.

Як правило, бази даних, згадані в схемі на рис. 5.2, існують на підприємстві, адже необхідні для ведення діяльності не залежно від ступеню автоматизації потоків даних.

База даних «Склад» містить відомості про перелік витратних матеріалів, які використовуються у виробничому процесі, а також технічних характеристик цих матеріалів та економічних показників (насамперед собівартість). Ця БД є спільною для виробничого відділу (на деяких підприємствах – відділ головного інженера) та відділу матеріального забезпечення.

База даних «Стандарти» містить всі стандарти на марки сталі та види готової продукції, які виготовляються на підприємстві, а також стандарти на певні технологічні операції. Цю БД веде відділ контролю якості та використовує виробничий відділ. Вона забезпечує данні для БД «Техпроцес».

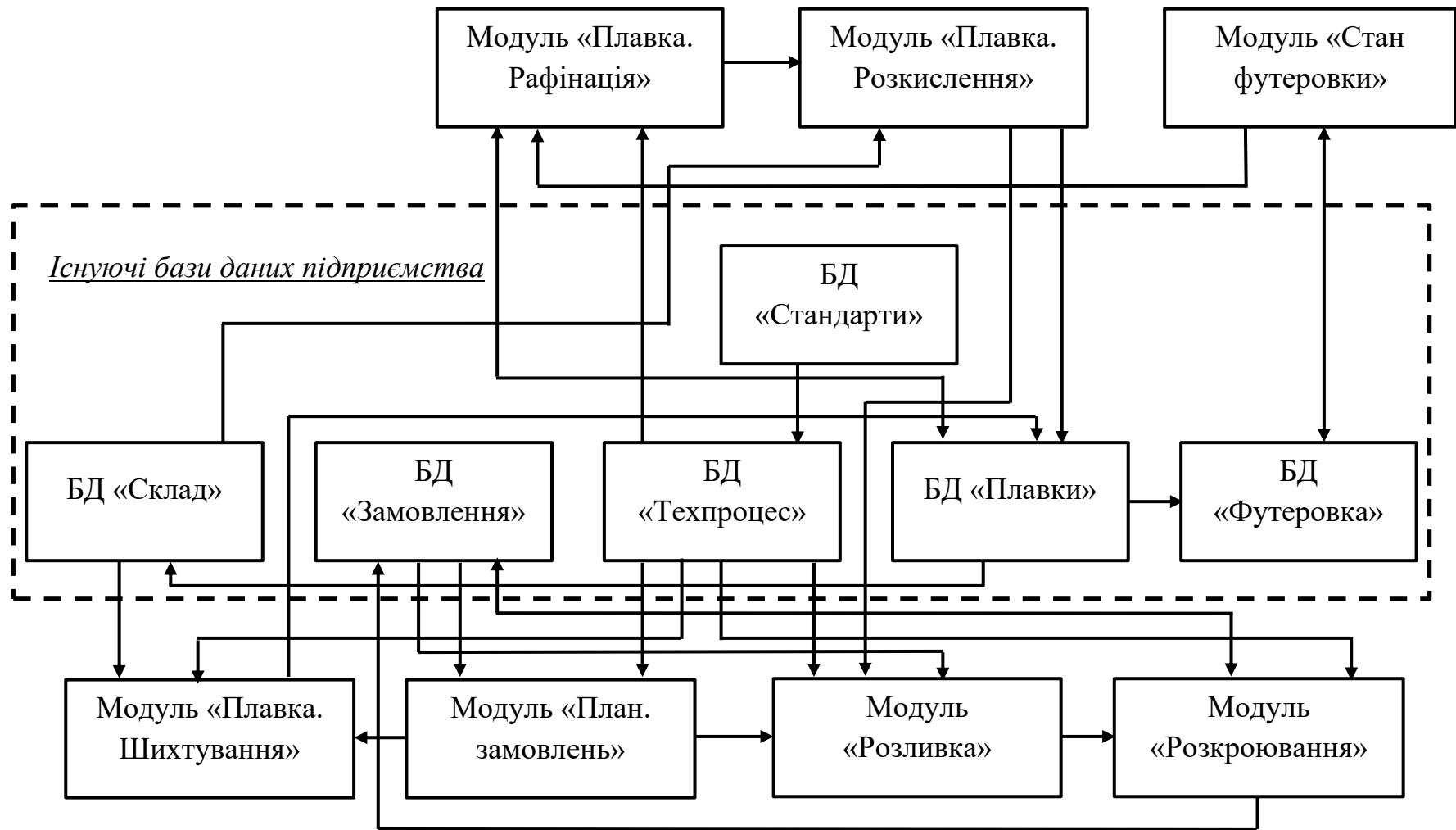


Рис. 5.2. Схема взаємодії модулів СППР виробництва прокату з існуючими базами даних

База даних «Техпроцес» використовує стандарти на виготовлення готової продукції та марочник сталі й містить технологічні інструкції на кожен з операцій, включно з видом обладнання, яке застосовується, його налаштуваннями залежно від виду продукції, а також діями операторів ділянок технологічних процесів. Це основна база даних відділу головного інженера разом з БД «Плавки».

База даних «Плавки» містить відомості про весь хід виготовлення сталі в конвертерному цеху і включає відомості про:

- складові шихтування;
- перебіг процесу з основними та додатковими операціями (азотування торкретування тощо);
- хід продувки та розкислення (використані матеріали, час, параметри дуття);
- масові, хімічні та фізичні показники готової продукції;
- відповідність замовленню.

База даних «Замовлення» формується відділом маркетингу (відділ продажів на інших підприємствах) і містить деталі замовлень, що надходять на підприємство і виконуються. Включає терміни виконання, ціну, розрахункову собівартість, вид продукції та її стандарт, умови пакування та транспортування. Використовується одразу декількома модулями системи – спочатку при плануванні виконання замовлень, а потім при плануванні контролі операцій розливки та розкроювання заготовок та готової продукції.

Нарешті база даних «Футеровка» містить історичну агрегацію умов роботи та тривалості роботи попередніх та поточної футеровок. Ця інформація використовується для формування рекомендації щодо ведення плавки у відповідному модулі.

В разі відсутності на підприємстві тієї чи іншої БД як виокремлено інформаційної одиниці, запропонований підхід передбачає створення відповідних баз даних з масиву інформації, використовуваного на виробництві.

Таблиця 5.1 – Взаємодія модулів СППР управління металургійним виробництвом

| № з/п | Модуль системи | Вхідні канали | | Вихідні канали | |
|-------|----------------------|-------------------------------|--|----------------------------------|--|
| | | Джерело | Інформація | Адресат | Інформація |
| 1 | Планування замовлень | БД «Замовлення» | Об'єм замовлення, марка сталі, вид продукції, стандарт | Модуль «Плавка. Шихтування» | План виробництва |
| | | БД «Техпроцес» | Перелік налаштувань обладнання для випуску певної продукції, час та собівартість робіт | Модуль «Розливка» | План виробництва |
| 2 | Плавка. Шихтовка | БД «Склад» | Наявність та собівартість складових шихти | БД «Плавка» | Шихтовка плавки |
| | | БД «Техпроцес» | Вимоги до готової продукції + стандарти | | |
| | | Модуль «Планування замовлень» | План виробництва | | |
| 3 | Плавка. Рафінація | Модуль «Стан футеровки» | Рекомендації щодо ведення плавки | БД «Плавка» | Параметри ведення плавки |
| | | БД «Техпроцес» | Вимоги до готової продукції + стандарти | Модуль «Плавка. Розкислення» | Хімічний склад та температура сталі |
| | | БД «Плавка» | Початковий стан шихти | | |
| 4 | Плавка. Розкислення | Модуль «Плавка. Рафінація» | Хімічний склад та температура сталі | Модуль «Розливка» | Маса сталі і шлаку |
| | | БД «Склад» | Наявність та собівартість розкислювачів | БД «Плавка» | Характеристики готової продукції, хід плавки |
| | | БД «Техпроцес» | Вимоги до готової продукції + стандарти | | |
| 5 | Розливка | БД «Техпроцес» | Параметри злиwkів та передільних заготовок | Модуль «Розкроювання» | Карти розкроювання |
| | | Модуль «Планування замовлень» | План виробництва | | |
| | | Модуль «Плавка. Розкислення» | Маса сталі і шлаку | | |
| | | БД «Замовлення» | Перелік замовлень | | |
| 6 | Розкроювання | Модуль «Розливка» | Карти розкроювання | БД «Замовлення» | Результати розкроювання |
| | | БД «Замовлення» | Перелік замовлень | | |
| | | БД «Техпроцес» | Параметри злиwkів та передільних заготовок | | |
| 7 | Стан футеровки | БД «Футеровка» | Історія експлуатації поточної та попередніх футеровок | БД «Футеровка» | Рекомендації щодо ведення плавки |
| | | | Модуль «Плавка. Рафінація» | Рекомендації щодо ведення плавки | |

Всі обчислювальні, оптимізаційні та рекомендаційні процеси відбуваються у окремих модулях СППР. Для кращого розуміння зв'язків між базами даних і модулями СППР керування металургійним виробництвом, вхідна та вихідна інформація для кожного з модулів, представлених на рисунку 5.2, зведена в таблиці 5.1.

Кожен з виділених на рис. 5.2 модулів системи передбачає, крім організації інтерфейсу вводу-виводу, розв'язання певної задачі, математичні постановки яких і підходи до вирішення описані в розділах 2 і 3. В більшості модулів вирішуються складні прикладні задачі умовної оптимізації. Для розв'язання цих задач використовується обчислювальний метод на основі моделювання штучної імунної системи людини, описаний в розділі 4.

Нижче викладено особливості організації окремих модулів СППР керування металургійним виробництвом та організація їх роботи, що має принципову відмінність від наявних аналогів.

Виходячи з структури СППР на рис. 5.2, інтегрована система підтримки прийняття рішень виробництва прокату повинна виконувати наступні функції:

- 1) Введення, редагування, перетворення, використання, оновлення та зберігання інформації щодо технологічних процесів на виробництві, стандартів, якими визначаються ці процеси, матеріали та готова продукція, щодо стану обладнання та перебігу технологічного процесу.

- 2) Розв'язання математичних задач оптимізації, прогнозування, самонавчання та прийняття рішень на окремих етапах технологічного процесу виготовлення металургійної продукції на основі апріорної накопиченої інформації та поточної інформації про вхідні замовлення та перебіг технологічних процесів.

- 3) Організація паралельної взаємодії у реальному масштабі часу між окремими модулями та базами даних, що відповідають різним етапам технологічного процесу з урахуванням глобальних економічних критеріїв та їх інформаційного узгодження.

4) Всебічний контроль перебігу технологічного процесу, зокрема, наявності і якості матеріалів, стан обладнання, характеристики сталі, заготовки та готової продукції, її кількість на кожному виробничому відрізку для забезпечення.

5) Ведення динамічної бази даних у складі інтегрованої системи, що дозволяє без витрати часу включати до плану діяльності нові замовлення, що надходять, починаючи вже з наступного етапу планування (зміна чи доба).

6) Формування у зручній для користувача і зрозумілій формі рекомендацій, які дозволять виконувати весь комплекс робіт від отримання замовлення до видачі готової продукції.

5.2 Робота та налаштування окремих модулів інтегрованої СППР

Робота окремих модулів інтегрованої системи підтримки прийняття рішень визначається насамперед природою процесів, в яких здійснюється керування, а саме їх відношенням до часу. Всі модулі, пов'язані з плавкою, розливкою та розкроюванням, працюють фактично в реальному часі, супроводжуючи вкрай швидкоплинні процеси рафінації, розкислення, розливки та розкроювання передільної заготовки. Водночас модулі планування виконання замовлень, шихтування та особливо контролю якості футеровки мають для виконання своїх завдань певний запас часу, відтак мають забезпечувати максимальну прийнятну точність отриманих рішень.

Модуль «Планування замовлень» з певною періодичністю (одна зміна або доба) отримує дані з баз даних «Замовлення» і «Техпроцес», аби отримати перелік поточних замовлень, їх техніко-економічні характеристики та необхідні налаштування обладнання окремих технологічних ланок. Наслідком розв'язання задачі комбінаторної оптимізації послідовності виконання замовлень є така послідовність, що задовольняє економічному критерію мінімуму додаткових витрат (2.5). Побудову оптимальної послідовності на момент прийняття рішення

покладено на метод моделювання штучної імунної системи, докладно розглянутий в розділі 4. Отримане рішення зберігається у вигляді впорядкованого списку замовлень, доступного для наступного використання модулями «Плавка. Шихтування» та «Плавка. Розливка». Саме узгодження цих операцій з урахуванням виду замовлення дозволить в підсумку зменшити витратний коефіцієнт металу.

Модуль «Плавка. Шихтування» отримує з бази даних «Склад» інформацію про наявність та собівартість складових шихти, з БД «Техпроцес» - вимоги до готової продукції в поточному замовленні та стандарти, що її ідентифікують, а з модулю «Планування замовлень» - поточне замовлення, яке необхідно виконати. Вся ця інформація використовується для розв'язання задачі (3.1)-(3.6) оптимізації шихтування за глобальним економічним критерієм з урахуванням існуючих обмежень.

Розв'язання оптимізаційної задачі, постановка якої докладно обґрунтована в розділі 3.1, виконується вже згаданим методом на основі ШІС, докладно описаним в розділі 4. На розв'язання задачі і видачу рекомендацій у модуля «Шихтування» є від 30 хвилин (при роботі лише одного конвертора - середній час попередньої плавки) до 10 хвилин (при одночасній паралельній роботі трьох конвертерів). Як буде показано нижче, працюючи на існуючому обладнанні, запропонований метод оптимізації на основі ШІС знаходить субоптимальне рішення за менший час, залишаючи оператору конвертера можливість вивчити запропоновану рекомендацію і за необхідності внести в неї коригування. Результат розв'язання оптимізаційної задачі формування шихти передається в БД «Плавки» для наступної реалізації й збереження.

Результатом роботи програми є таблиця, в якій визначено масу основних складових шихти на початок плавки, яку слід завантажувати в конвертер для виготовлення заданої кількості сталі заданої марки за описаних раніше умов. Приклад відповіді, яку надає розроблена програма-прототип, наведений на рисунках 5.3 і 5.4.

| Необхідно розлити - 59т, шихта - 67т (±0,2т) | | | |
|--|--------|--------|----------|
| Матеріал | т | кг/т | кг/100кг |
| Чавун | 53.60 | 908.50 | 90.85 |
| Брухт | 11.09 | 188.00 | 18.80 |
| Чавун бій | 0.89 | 15.00 | 1.50 |
| Чавун чушка | 0.59 | 10.00 | 1.00 |
| Брухт (10% Кре) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Брухт сталевий | 9.62 | 163.00 | 16.30 |
| Скрап чавуну | 0.62 | 10.50 | 1.05 |
| Скрап сталевий | 0.11 | 1.90 | 0.19 |
| Металізований шлак | 0.27 | 4.50 | 0.45 |
| Залізовмісні брикети | 0.59 | 10.00 | 1.00 |
| Вапно холодногашене | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Вапно горячегашене | 3.84 | 65.00 | 6.50 |
| Вапно загальне | 3.84 | 65.00 | 6.50 |
| Вапняк | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Брикети MgO | 0.30 | 5.00 | 0.50 |
| Плавиловий шпат | 0.10 | 1.69 | 0.17 |
| Доломит | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Шихта отримана | 66.28 | | |
| Відхилення, % | -1.07% | | |

Рис. 5.3. Приклад результатів розрахунку шихтування відповідним модулем

| | | | | | | |
|------------------------|------------|--------------|---|--------------|-------------|---------------|
| Надходження тепла | КДж/100кг | % | Отримано сталі до розкислення, т | 58.75 | | |
| Рідкий чавун | 108744.54 | 51.60 | Отримано сталі після розкислення | 59.05 | | |
| Міксерний шлак | 516.5 | 0.25 | Лужність складна | 2.62 | | |
| Горіння домішків | 84668.703 | 40.17 | Матеріальний баланс, % | 0.08% | | |
| Окислення заліза | 11699.8 | 5.55 | Додати охолоджувач (вапняк), т | 0.00 | | |
| Шлакоутворення | 5125.6 | 2.43 | | | | |
| Загалом: | 210755.3 | 100.00 | | | | |
| | | | | | | |
| Витрати тепла | КДж/100кг | % | Кількість і склад конвертерних газів | | | |
| Готова сталь | 141785.1 | 67.28 | Складові газу | | | |
| Шлак | 26565.5 | 12.60 | кг | м3 | % | |
| Конвертерні гази | 18450.8 | 8.75 | CO | 8.05 | 6.44 | 81.14 |
| Дисоціація заліза | 1342.7 | 0.64 | CO2 | 2.20 | 1.12 | 14.13 |
| Дисоціація вапна | 1838.2 | 0.87 | N2 | 0.13 | 0.10 | 1.27 |
| Викид пилу | 927.4 | 0.44 | O2 | 0.39 | 0.27 | 3.46 |
| Розбризування | 2983.764 | 1.42 | Загалом | 10.76 | 7.93 | 100.00 |
| Нагрівання ковертера | 16860.4 | 8.00 | | | | |
| Загалом: | 210753.9 | 100.00 | | | | |
| | | | | | | |
| Тепловий баланс | 1.4 | 0.06% | Хім.склад шлаку, % | | | |
| Корекція брухту | | 0.00 | SiO2 | 19.49 | | |
| | | | Al2O3 | 1.58 | | |
| | | | MnO | 5.96 | | |
| | | | CaO | 47.45 | | |
| | | | MgO | 3.59 | | |
| | | | P2O5 | 0.69 | | |
| | | | S | 0.25 | | |
| | | | FeO | 15.00 | | |
| | | | Fe2O3 | 6.00 | | |

Рис. 5.4. Результат перевірки теплового і матеріального балансу плавки

Модуль «Футеровка» відповідає за формування перед початком кожної плавки вікна з рекомендацією оператора конвертера. Приклад вікна-рекомендації наведено на рисунку 5.5.

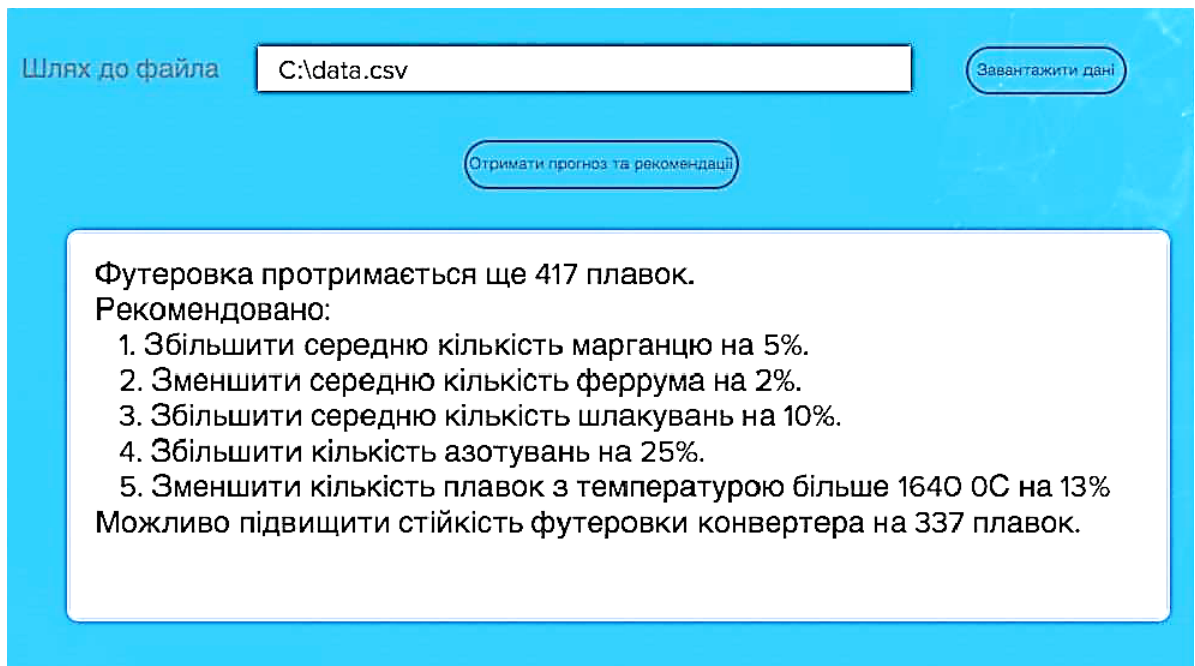


Рис. 5.5. Інтерфейс модуля «Футеровка» з прогнозом та рекомендацією

Даний модуль, отримуючи дані про поточну футеровку, а також дані про всі проведені раніше плавки з відповідних баз даних, виконує наступні функції:

- обробляє вхідну інформацію, видаляючи з даних викиди і аномальні значення;
- відносить поточну футеровку у відповідності до викладеного в розділі 3.3 алгоритму до одного з кластерів;
- прогнозування стійкості футеровки за допомогою отриманих вище моделей прогнозування на основі методу групового врахування аргументів;
- зворотний прорахунок з метою максимізації можливого очікуваного значення стійкості футеровки з урахуванням її властивостей та особливостей експлуатації.

Остання задача вирішується як зворотна по відношенню до задачі прогнозування – за допомогою еволюційного алгоритму відшукуються такі параметри ведення плавки для поточної футеровки, які б забезпечували максимальний статистично очікуваний термін її роботи.

На побудові модулів, що працюють в реальному масштабі часу, зупинимося детальніше.

5.3 Алгоритми та функції підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі

У оператора киснево-конвертерного цеху, що керує процесом продувки, час для прийняття управлінських рішень про збільшення/зменшення інтенсивності продувки, підняття/опускання фурми, закінчення продувки тощо вкрай обмежений. Час продувки в 100-350 тонних конвертерах не перевищує 20-25 хвилин, а тривалість усієї плавки в конвертерах ємністю 100-350 тон (з наступними операціями зливання в ківш та розкислення) становить близько 40-50 хвилин [91, 238]. Відповідно оператор працює, спираючись на власний досвід, при цьому кількість можливих помилок в його роботі залежить від фізичного та морального стану оператора, виконання плану виробництва цехом тощо. Найбільш характерними наслідками помилок оператора є отримання параметрів, що виходять за інтервал, необхідний для даної марки сталі, підвищена витрата кисню та присадок, перевищення температури готової сталі. Як наслідок, за статистикою [93], до 40% плавок вимагають корекції після завершення процесу.

Метою інтелектуальної підсистеми інтегрованої СППР у контурі управління кисневим конвертером є не лише автоматизація дій та оптимізації процесу, а також зменшення впливу на результат людського фактору, що в свою чергу призводить до покращення економічних показників виробництва.

Для досягнення поставленої мети пропонується розділити контрольовані параметри технологічного процесу на статичні та динамічні, а також на керовані та некеровані. До статичних характеристик технологічного процесу конвертерної плавки слід зарахувати величини, які згідно із запропонованою інформаційною технологією, передаються оператору з бази даних «Плавка» як результат розв'язання задачі оптимального шихтування (див. розділ 3). До числа цих параметрів входять: маса і температура шлаку, склад шлаку, маса чавуну, сталевого брухту та вапна (вапняку) тощо. Водночас ключовими координатами, впливаючи на які можна покращити техніко-економічні показники готової

продукції, є динамічні характеристики протікання процесу плавки. До останніх слід включити: масу і температуру металу, склад і температуру конвертерних газів, висоту фурми над рівнем ванни і витрату кисню, а також час продувки.

Представимо технологічний процес плавки схематично у вигляді об'єкта управління, як показано на рисунку 5.6.

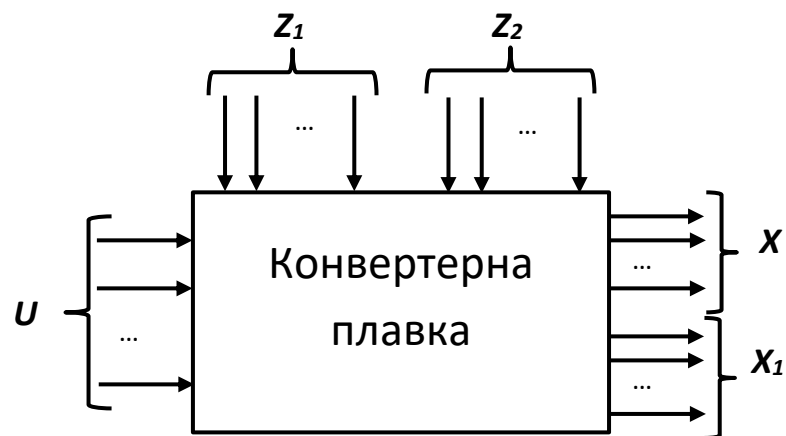


Рис. 5.6 Конвертерна плавка як об'єкт управління

У даному представленні керуючі величини об'єднані у вектор U . Оператор може керувати під час плавки інтенсивністю подачі кисню, висотою фурми, додавати охолоджуючі речовини (окатиші, вапняк тощо) чи інтенсифікатори. Також до вектора керування входить час продувки.

Збурення, які можна виділити в даному процесі, поділяються на два вектори: Z_1 – контрольовані збурення (вміст у чавуні кремнію, марганцю, сірки, фосфору, температура чавуну, вміст кисню в дутті, інтервал часу між плавками тощо) і Z_2 – неконтрольовані збурення (якість сипких матеріалів, склад, розміри та температура брукхту, маса і склад міксерного шлаку, що потрапляє в конвертер і т.д.).

Результатом управління є параметри технологічного циклу, які також пропонується розділити на два вектори: X – технічні характеристики отриманої сталі (її кількість, хімічний склад і температура на момент припинення рафінації) та X_1 – параметри, що визначають економічні показники технологічного процесу (кількість використаного кисню, час продування, кількості використаних охолоджувачів та присадок).

Традиційно [92] головним завданням керування конвертерною плавкою є одержання сталі заданої марки за вмістом вуглецю. За великим рахунком, це завдання зводиться до правильності визначення часу припинення продування. Але подібний «однокоординатний» підхід дуже спрощений, оскільки зазвичай немає прямої інформації про вміст вуглецю у ванні по ходу продування. Швидкість вигорання вуглецю така, що на заключному етапі продування одна зайва хвилина відповідає переходу до іншої марки сталі [226]. Додатковим фактором, що ускладнює подібний «прямий» розрахунок, є суттєва нелінійна залежність вигорання вуглецю не тільки від часу продування, а й від температури розплаву [227].

Проведені раніше дослідження [68] показали, що комплексна задача керування плавкою передбачає отримання в момент закінчення плавки (підняття фурми) не тільки заданого вмісту вуглецю, але і необхідної температури сталі. Забезпечується це як правильним вибором режимів продування, так і правильним розрахунком кількості охолоджувачів. Останнє особливо актуально при великій інтенсивності продування, коли конвертер працює в режимі з обмеженням на час плавки, адже тоді охолодження частково здійснюється за рахунок присадок руди, брuxту та вапняку по ходу продування, а також внаслідок зміни висоти розташування кисневої фурми [239, 240].

Від відстані наконечника фурми до рівня ванни залежить ступінь засвоєння кисню ванною, температурний та шлаковий режими плавки. Водночас, як було показано в попередніх розділах, надмірний перегрів ванни, висока основність розплаву та суттєвий викид металу в шлак призводять до значного скорочення терміну роботи футеровки конвертера, його зупинки на профілактику, а відтак підвищення собівартості продукції. Висота фурми, час введення охолоджувачів та їх об'єми, а також інтенсивність подачі кисню є головними динамічними параметрами, управління якими дозволяє вирішити два основні завдання: забезпечити отримання сталі необхідної марки незалежно від випадкових вхідних факторів і разом з тим мінімізувати витрату кисню та присадок у процесі продування, тим самим зменшивши собівартість одержуваної сталі [241].

Пропонується здійснити це шляхом моделювання поведінки реального оператора з урахуванням результатів його попередніх дій. Для цього в базі даних «Плавки» відшукуються всі протоколи, які відповідають поточним початковим умовам шихтування та завданню на вид сталі, що має бути виготовлений. Числові дані на вході описують, крім масових, також хімічні характеристики чавуну та брухту, використаного на плавку, та готової сталі, яка має бути отримана. Формат вхідних даних модулю описує фрагмент розрахункової таблиці на рисунку 5.7.

| | C | Si | Mn | S | P | t |
|----------------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-------------|
| Чавун рідкий | 4.3 | 0.8 | 0.7 | 0.035 | 0.05 | 1290 |
| Чавун в чушках | 4.2 | 0.8 | 0.7 | 0.035 | 0.05 | |
| Брухт чавуну | 4.25 | 0.9 | 0.65 | 0.035 | 0.05 | |
| Брухт (10% Кремнію) | 0.2 | 10 | 0.5 | 0.200 | 0.05 | |
| Брухт сталевий | 0.2 | 0.1 | 0.5 | 0.040 | 0.025 | Тпрост |
| Шихта загалом | 4.045 | 0.765 | 0.734 | 0.049 | 0.051 | 29 |
| | | | | | | |
| Готова сталь | C | Mn | S | P | t | Маса |
| | 0.18 | 0.15 | 0.03 | 0.009 | 1630 | 59 |

Рис. 5.7. Вхідні дані поточної плавки для пошуку аналога

Наведені на рис. 5.7 величини разом з масовими показниками шихтування створюють описаний вище вектор контрольованих збурень Z , а параметри готової сталі – вектор цільових змінних внаслідок керування X^* .

В [242] обґрунтований докладний вибір кількості таких зразків та метрика, за якою обчислюється схожість поточної плавки з попередніми. В базі даних попередніх плавок відшукувались протоколи, які мають найменшу зважену відстань до поточного Z та X^* в просторі координат. Критерій близькості D вираховувався за нормованою метрикою

$$D = \alpha \sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i - z_i^0}{z_i^0} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \left(\frac{x_j^* - x_j^{*0}}{x_j^{*0}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (5.1)$$

де α – ваговий коефіцієнт початкових умов, який врівноважує вектори Z та X^* в просторі координат; n – кількість елементів вектору початкових умов; m –

кількість елементів вектору що описує готову сталь; z_i – числове значення i –тої координати початкових умов попередньої плавки (зразка), $i = \overline{1, n}$; z_i^0 – числове значення i –тої координати початкових умов поточної плавки; x_j^* – значення j –того параметру готової сталі для плавки-зразка, $j = \overline{1, m}$; x_j^{*0} – значення j –того параметру готової сталі для поточної плавки (приймаються граничні згідно ДСТУ).

На практиці до вектору Z включаються: запаси охолоджуючих речовин основних шести типів, час очікування конвертера після попередньої плавки, хімічний склад шихти (5 складових), температура чавуну та маса шихтування. При цьому різна розмірність координат не має значення, адже вони нормуються через наявність поточної координати в знаменнику (5.1).

Коефіцієнт α має приймати значення більше 1, якщо виплавляється традиційна марка сталі, прецедентів виготовлення якої (в тому числі вдалих) в базі даних плавок існує велика кількість. В цьому випадку друга складова в (5.1) фактично має перетворюватись на 0, адже нас цікавлять вдалі приклади з пам'яті виплавки саме такої марки сталі, яка задана. Якщо ж виплавляється нова сталь, вдалих випадків виготовлення якої в базі даних плавок мало, або ж вони відсутні, найкращі показники отримано при значенні $\alpha = 0,1..0,25$. Це дозволяє підтягувати з БД протоколи плавок, у яких була отримана інша сталь з максимально близькими параметрами (вектор X^*).

Згідно із запропонованою методикою, серед найближчих аналогів обираються ті протоколи попередніх плавок, які мають найменшу нормовану відстань за (5.1) та водночас найкращі економічні показники – вектор X_1 згідно схеми рис. 5.6. Бажаними економічними показниками ефективності керування продувкою вважаються [241]:

- відсутність додаткової витрати кисню,
- відсутність перевищення планового часу продувки,
- відсутність додувок,
- відсутність перевищення кількості охолоджувачів,

- відсутність порушення умови основності шлаку.

Згортка економічних критеріїв має вигляд

$$C = \frac{c_1 V'_{O_2} + c_2 t' + c_3 N_d t_d + \sum_{k=1}^p (c_{4k} m'_k) + c_5 p H'}{c_{st} M_{st}} \rightarrow \min, \quad (5.2)$$

де c_i – приведена до грошової оцінки вартість додаткових витрат на плавку за i -тою причиною, грн., $i = \overline{1,5}$; c_{st} – вартість 1 тони готової сталі, грн; M_{st} – розрахункова маса плавки, тон; V'_{O_2} – понаднормова витрата кисню, м³; t' – перевищення запланованого часу продувки, сек; N_d – кількість додувок; t_d – загальний час додувок, сек; m'_k – маса додаткових витрати охолоджувача k -того виду, тон, $k = \overline{1,p}$; p – кількість доступних видів охолоджувачів, зазвичай $p = 3 \dots 6$; pH' – відхилення основності шлаку від заданого значення.

Як показано в [117], відхилення хімічного складу, температури готової сталі чи інших характеристик процесу рафінації від заданих значень в підсумку збільшує собівартість сталі. В найкращого аналогу з БД плавок критерій (5.2) має дорівнювати 0. Це ж стосується і критерію (5.1).

Завдяки введенню у вирази критеріїв коефіцієнтів, що пов'язують відхилення процесу, що розглядається, від процесу з пам'яті (відносно відстань в просторі станів) з вартістю цього відхилення, критерії C та D мають однакову розмірність (відносні одиниці). Тому оцінка кращих зразків ведення плавки з бази даних виконується за рівноважною згорткою за нормалізованими значеннями векторів Z , X та X_1 та їх відповідності до реальних умов:

$$F = e^{-(C+D)} \rightarrow \max. \quad (5.3)$$

Якщо декілька попередніх плавки мають однакову якість за (5.3), вони всі беруться до розгляду. Така ситуація, наприклад, $F = 1$ для кількох плавки з пам'яті, трапляється, якщо в БД «Плавки» міститься певна кількість плавки, у яких були дотримані всі економічні показники, що входять до (5.2), тобто $C = 0$, та водночас початкові умови співпадали з поточними за (5.1), тобто $D = 0$.

В іншому випадку за зразок обирається обмежена підмножина потужністю ν найкращих варіантів ведення плавки в минулому, для яких

показник за (5.3) є вищим за певний пороговий рівень F_{min} . Останній встановлюється емпіричним шляхом і збільшується з накопиченням в пам'яті великої кількості вдалих прецедентів. Для базових підприємств найкращі результати забезпечували значення:

- при виготовленні «традиційної» марки сталі (в базі плавок понад 1000 прецедентів) - $F_{min} = 0,9 \dots 0,95$;

- при виготовленні «нової» марки сталі (в базі плавок до 1000 прецедентів) - $F_{min} = 0,75 \dots 0,88$.

Сценарій поведінки оператора конвертера будується як вектор, усереднений за найкращими відібраними з пам'яті зразками, який має вигляд, представлений у таблиці 5.1. Якщо в якості зразків обираються сценарії з різною кількістю зміни висоти фурми, зміни рівня подачі кисню та кількості внесень охолоджувачів, за базовий приймається сценарій з найбільшою кількістю моментів, а у сценарії з меншою кількістю зміни керуючих впливів вносяться рядки, які не містять змін поточної координати.

Вектори однакової довжини усереднюють зваженою згорткою всіх взятих до розгляду сценаріїв, де ваговими коефіцієнтами виступають оцінки близькості за (5.3)

$$t'_i = \frac{\sum_{l=1}^v (t_{il} F_l)}{\sum_{l=1}^v F_l} , \quad (5.4)$$

$$W'_i = \frac{\sum_{l=1}^v (W_{il} F_l)}{\sum_{l=1}^v F_l} , \quad (5.5)$$

де t'_i – зважений час виконання i – тої дії, сек; W'_i – зважений числовий показник виконання i – тої дії у відповідних одиницях виміру; t_{il} – час виконання i – тої дії в сценарії $l = \overline{1, v}$, сек; W_{il} – числовий показник виконання i – тої дії в сценарії $l = \overline{1, v}$; v – кількість «кращих» сценаріїв, відібраних за (5.3); F_l – значення зведеного критерію оптимальності l – того сценарію за (5.3).

Таблиця 5.2 – Вигляд вектору, що описує один з сценаріїв ведення плавки оператором конвертера

| № елемента | Позначення | Значення | Сенс елемента |
|------------|--------------|----------|--|
| U1 | t_{Σ} | 801 | загальний час продувки – 801 секунда |
| U2 | N_f | 8 | кількість змін висоти фурми – 8 |
| U3 | N_{O_2} | 5 | кількість змін рівня подачі кисню – 6 |
| U4 | N_t | 6 | кількість моментів внесення охолоджувачів – 6 |
| U5 | t_{1f} | 0 | перший час зміни висоти фурми, сек |
| U6 | H_{1f} | 4.20 | перша висота фурми, м |
| U7 | t_{2f} | 120 | другий час висоти фурми, сек |
| U8 | H_{2f} | 3.50 | друга висота фурми, м |
| ... | ... | ... | ... |
| U17 | t_{Nf} | 645 | останній час зміни висоти фурми, сек |
| U18 | H_{Nf} | 1.96 | остання висота фурми, м |
| U19 | t_{1O_2} | 0 | перший час зміни подачі кисню, сек |
| U20 | V_{1O_2} | 1380 | перший рівень подачі кисню, м ³ /хв |
| U21 | t_{2O_2} | 249 | другий час зміни подачі кисню, сек |
| U22 | V_{2O_2} | 1330 | другий рівень подачі кисню, м ³ /хв |
| ... | ... | ... | ... |
| U27 | t_{NO_2} | 660 | останній час зміни подачі кисню, сек |
| U28 | V_{NO_2} | 1380 | останній рівень подачі кисню, м ³ /хв |
| U29 | T_{Nt1} | 69 | Час першого введення охолоджувача, сек |
| U30 | V_{Nt1} | 10 | Об'єм охолоджувача, що вводиться, т |
| U31 | M_{Nt1} | m1 | тип охолоджувача, що вводиться (m1 – вапно ГГ) |
| ... | ... | ... | ... |
| U44 | T_{Nt1} | 730 | Час останнього введення охолоджувача, сек |
| U45 | V_{Nt1} | 0.1 | Об'єм охолоджувача, що вводиться, т |
| U46 | M_{Nt1} | m7 | тип охолоджувача, що вводиться (m7 – вугілля) |

В таблиці 5.2 представлений один з векторів, що створюється за запропонованою інформаційною технологією з бази даних «Плавки» для підтримки прийняття рішень оператором конвертера.

Рисунок 5.8 ілюструє рекомендації щодо зміни висоти фурми, а рис. 5.9 – щодо зміни рівня подачі кисню при виконанні плавки за шістьма відібраними сценаріями-зразками, один з яких наведений в таблиці 5.3.

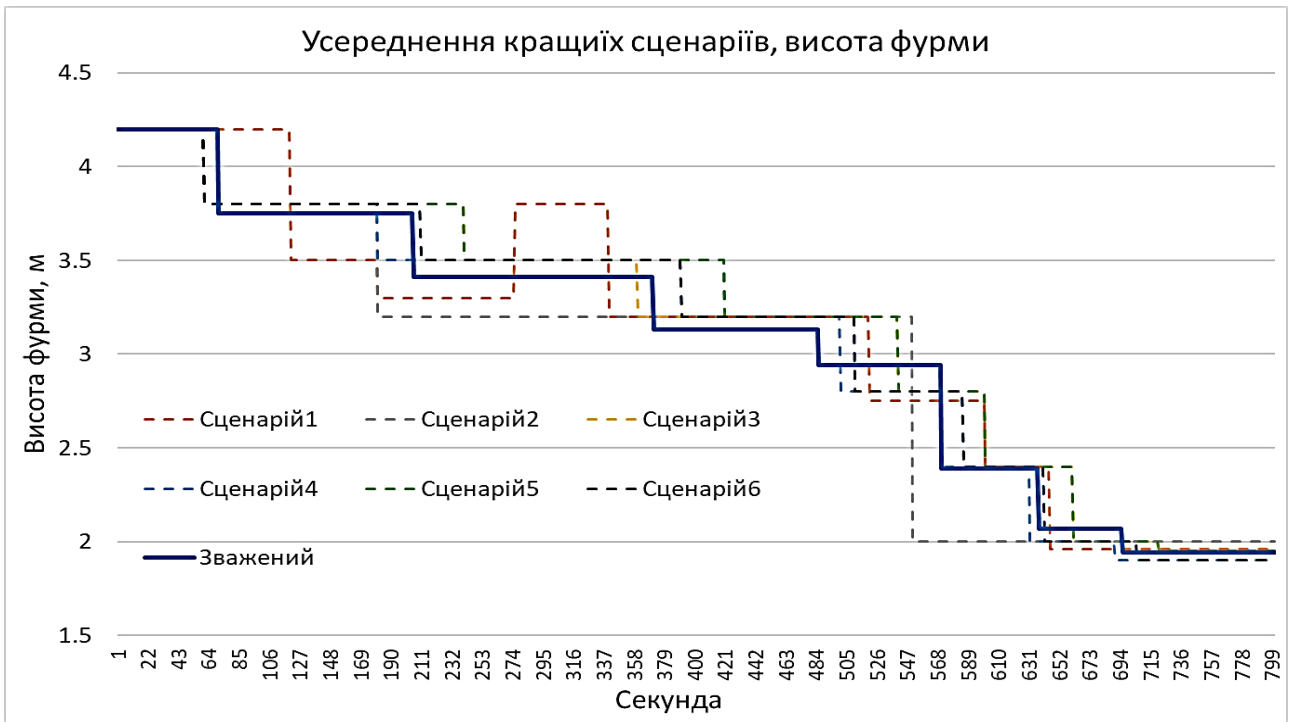


Рис. 5.8. Рекомендації щодо зміни висоти фурми під час плавки з усередненням

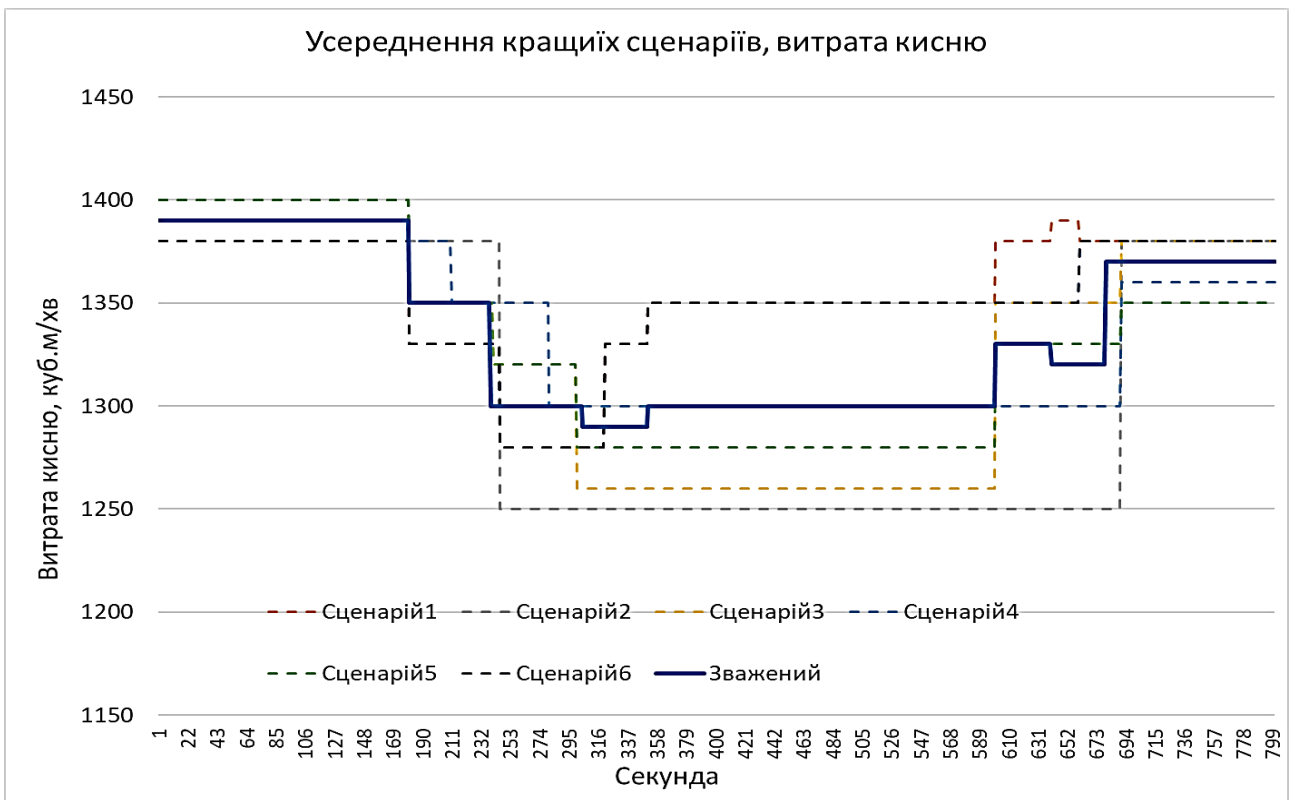


Рис. 5.9. Рекомендації щодо зміни витрати кисню під час плавки з усередненням

Як можна побачити на рис. 5.8 та 5.9, відібрані за початковими і кінцевими умовами «найбільш близькі» сценарії відрізняються при цьому між собою іноді доволі суттєво. Зокрема, для шести сценаріїв мають місце 25 різних моменти

часу зміни висоти фурми і 13 різних моментів часу зміни витрати кисню. Водночас усереднення моментів виконання дій з приведенням до найдовшого сценарію дозволяє обійтися лише 8 змінами висоти фурми і 6 змінами подачі кисню.

Детально усереднення для розглянутого випадку ілюструють таблиці 5.3 та 5.4, де наведені початкові дані про сценарії, доповнення даних для вирівнювання кількості моментів перемикання (виділено курсивом) та розрахункові значення часу та керованої змінної.

Таблиця 5.3 – Формування рекомендацій щодо висоти фурми в системі самонавчання

| Сценарій1, F=1 | | Сценарій2, F=1 | | Сценарій3, F=1 | | Сценарій4, F=0.97 | | Сценарій5, F=0.91 | | Сценарій6, F=0.93 | | Рекоменд. | | |
|----------------|------|----------------|-------------|----------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-----------|------------|-------------|
| t | h | t | h | t | h | t | h | t | h | t | h | tsr | t* | H* |
| 0 | 4.20 | 0 | 4.20 | 0 | 4.20 | 0 | 4.20 | 0 | 4.20 | 0 | 4.20 | 0 | 0 | 4.2 |
| 120 | 3.50 | 60 | 3.80 | 60 | 3.80 | 60 | 3.80 | 60 | 3.80 | 60 | 3.80 | 70 | 70 | 3.75 |
| 180 | 3.30 | 180 | 3.20 | 240 | 3.50 | 180 | 3.50 | 240 | 3.50 | 210 | 3.50 | 205 | 205 | 3.41 |
| 275 | 2.80 | <i>370</i> | <i>3.20</i> | 360 | 3.20 | 420 | 3.20 | 420 | 3.20 | 390 | 3.20 | 373 | 371 | 3.13 |
| 340 | 3.20 | <i>485</i> | <i>3.20</i> | 540 | 2.80 | 500 | 2.80 | 540 | 2.80 | 510 | 2.80 | 486 | 485 | 2.94 |
| 520 | 2.75 | 550 | 2.00 | 600 | 2.40 | 570 | 2.40 | 600 | 2.40 | 585 | 2.40 | 571 | 570 | 2.39 |
| 600 | 2.40 | <i>635</i> | <i>2.00</i> | 660 | 2.00 | 630 | 2.00 | 660 | 2.00 | 640 | 2.00 | 638 | 637 | 2.07 |
| 645 | 1.96 | <i>695</i> | <i>2.00</i> | 720 | 1.95 | 690 | 1.90 | 720 | 1.95 | 705 | 1.90 | 696 | 695 | 1.94 |

Аналогічні рекомендації система формує для використання охолоджувачів (час, маса і вид охолоджувача).

Таблиця 5.4 – Формування рекомендацій щодо витрати кисню в системі самонавчання

| Сценарій1, F=1 | | Сценарій2, F=1 | | Сценарій3, F=1 | | Сценарій4, F=0.97 | | Сценарій5, F=0.91 | | Сценарій6, F=0.93 | | Рекоменд. | | |
|----------------|------|----------------|-------------|----------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-----------|------------|-------------|
| t | v | t | v | t | v | t | v | t | v | t | v | tsr | T* | V* |
| 0 | 1380 | 0 | 1380 | 0 | 1400 | 0 | 1400 | 0 | 1400 | 0 | 1380 | 0 | 0 | 1390 |
| 180 | 1330 | <i>180</i> | <i>1380</i> | 180 | 1350 | 180 | 1380 | 180 | 1350 | 180 | 1330 | 180 | 180 | 1350 |
| 245 | 1280 | 245 | 1250 | 240 | 1320 | 210 | 1350 | 240 | 1320 | 245 | 1280 | 238 | 238 | 1300 |
| 320 | 1330 | <i>304</i> | <i>1250</i> | 300 | 1260 | 280 | 1300 | 300 | 1280 | 320 | 1330 | 304 | 304 | 1290 |
| 351 | 1350 | <i>351</i> | <i>1250</i> | <i>351</i> | <i>1260</i> | <i>351</i> | <i>1300</i> | <i>351</i> | <i>1280</i> | <i>351</i> | <i>1350</i> | 351 | 351 | 1300 |
| 600 | 1380 | <i>600</i> | <i>1250</i> | 600 | 1350 | <i>600</i> | <i>1300</i> | 600 | 1330 | <i>600</i> | <i>1350</i> | 600 | 600 | 1330 |
| 640 | 1390 | <i>640</i> | <i>1250</i> | <i>640</i> | <i>1350</i> | <i>640</i> | <i>1300</i> | <i>640</i> | <i>1280</i> | <i>640</i> | <i>1350</i> | 640 | 640 | 1320 |
| 660 | 1380 | 690 | 1380 | 690 | 1380 | 690 | 1360 | 690 | 1350 | 660 | 1380 | 680 | 680 | 1370 |

Послідовність рекомендацій щодо дій оператора виводиться на інтерфейс користувача робочого місця оператора. Як було зазначено, оператор може не дотримуватись порад СППР, а виконувати плавку спираючись на власний досвід і враховуючи неконтрольовані збурення (вектор змінних Z_1). В кожному випадку, протокол ведення плавки і її результати зберігаються в БД «Плавки».

5.4 Алгоритм підсистеми оптимізації процесу розкислення сталі

Як зазначалося раніше, однією з функцій інтегрованої системи підтримки управлінських рішень у багатоетапному виробництві прокату є задача оптимізації кількості феросплавів, що використовуються в ході розкислення сталі, що після продувки містить значну кількість розчиненого кисню. Останній при кристалізації призводить до утворення пухиристих і нещільних зливків [117].

У вітчизняній металургійній практиці в якості розкислювачів найчастіше застосовуються феросиліцій, силікомарганець та феромарганець, які мають різну розкислювальну здатність, якість виведення та ціну. Оскільки ціна феросплавів є достатньо суттєвою часткою собівартості готової сталі, задача оптимального їх використання при розкисленні є актуальною.

Узагальнено керування технологічним процесом на етапі розкислення представлено схемою на рисунку 5.10.

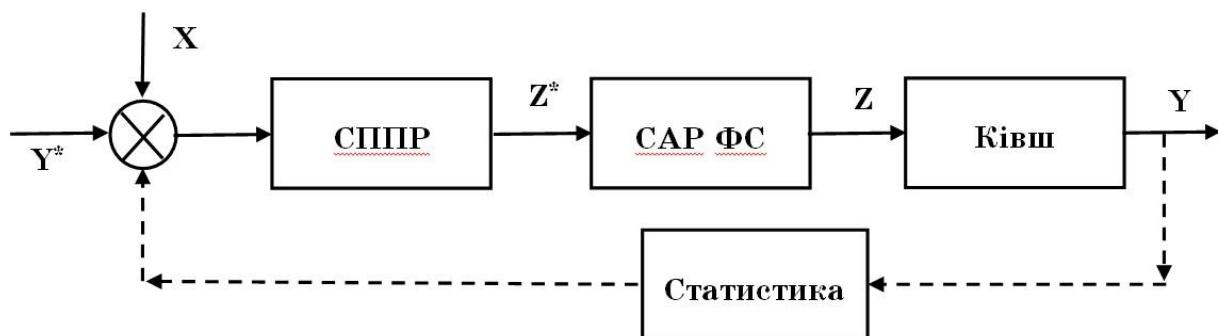


Рис. 5.10. Схема керування процесом розкислення

У якості входів для модулю «Плавка.Розкислення» СППР виступає вектор з заданого хімічного складу сталі, що виготовляється (вектор Y^*), а також параметри сталі в конвертері після продувки (вектор X , який у загальному випадку є збуренням). В залежності від значень компонентів цих векторів модуль «Плавка. Розкислення» формує керуючий вплив (вектор Z^*) як завдання на кількість розкислювачів різного вигляду, що подаються у ківш. Завдання відпрацьовується замкненою системою автоматичного регулювання феросплавного тракту (САР ФС), яка складається з регулятора, дозатора, системи засувок і датчиків. Відібрані феросплави (вектор Z) додаються у ківш на початковій фазі випуску сталі з конвертера, що сприяє максимальному засвоєнню розкислювачів сталевим розплавом і зменшує їх витрату в зоні шлаку [108]. В результаті керування маємо вектор Y , що описує хімічний склад отриманої сталі.

На рисунку 5.10 легко помітити головну особливість системи керування розкисленням: вона є розімкненою і використовує принцип керування за завданням. Використання в процесі роботи існуючої системи будь-якого зворотного зв'язку неможливе, оскільки до того часу, коли будуть отримані числові характеристики, що описують вихід, сенс керуючого впливу втрачається – сталь стає холодним зливком, у якому процеси розкислення завершені. Відтак необхідно використання статистичних даних про поведінку системи в попередніх плавках з метою формування завдання, що очікувано призведе до найбільш бажаних значень у векторі керованих змінних.

В якості механізму узагальнення даних і формування знань для модулю «Плавка. Розкислення» запропоновано використовувати «наївну» нейронну мережу Байєса [244]. Даний метод обробки знань має кілька важливих особливостей. По-перше, оскільки в моделі визначаються залежності між усіма змінними, легко обробляються ситуації, коли значення деяких змінних невідомі. По-друге, підхід дозволяє природним чином поєднувати закономірності, виведені з даних, і фонові знання, отримані в явному виді (наприклад, від експертів). Нарешті, використання описаного методу дозволяє уникнути

проблеми перенавчання (overfitting), чим страждають багато методів (наприклад, дерева рішень) при занадто буквальному наслідуванні розподілу зашумлених даних.

Незважаючи на свою простоту, швидкість та легкість інтерпретації результатів, наївно-байєсівський алгоритм має ряд недоліків, ключовим з яких є базове припущення про взаємну некорельованість усіх вхідних змінних (звідси «наївні» у назві). Водночас метод не дозволяє пряму обробку безперервних змінних – їх необхідно розбивати на певну кількість інтервалів, щоб параметри були дискретними.

Для побудови бази знань модулю «Плавка.Розкислення» були використані дані про плавки, виконані в конвертерному у цеху ПАТ «ДМЗ» (загалом 12039 плавок). В ході спілкування з експертами було з'ясовано, що значимими параметрами процесу розкислення при виробництві сталі є:

- чотири показники хімічного складу металу після продувки киснем (марганець, сірка, фосфор та вуглець),
- кількість трьох елементів розкислювачів (феромарганець, феросиліцій та силікомарганець),
- чотири відносні складові феросплавів (вміст марганцю і кремнію у феросиліції та силікомарганці),
- п'ять показників хімічного складу сталі після процесу розкислення – бажані значення (кремній, марганець, сірка, фосфор та вуглець).

Виходячи з цього, набір даних для проведення дослідження представляє собою таблицю розміром 12039×17 (за кількістю плавок та значущими параметрами). Враховуючи, що бажані або очікувані показники хімічного складу сталі, які на схемі рис. 5.10. позначені вектором Y , для даної задачі є вхідними, а цільовими керованими змінними є кількості трьох феросплавів, змінні задачі надалі позначаються у відповідності до таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Змінні задачі дослідження

| | Змінна | Од. вимір. | Значення змінної у початковій базі даних | Діапазон варіювання на наявних даних |
|---------|--------|------------|--|--------------------------------------|
| Вхідні | x1 | °C | Температура металу | 1559-1698 |
| | x2 | % | Mn до розкислення | 0,03-0,8 |
| | x3 | % | S до розкислення | 0,012-0,05 |
| | x4 | % | P до розкислення | 0,002-0,031 |
| | x5 | % | C до розкислення | 0,04-0,86 |
| | x6 | % | Si у готовій сталі | 0,05-0,12 |
| | x7 | % | Mn у готовій сталі | 0,5-0,8 |
| | x8 | % | S у готовій сталі | 0,013-0,05 |
| | x9 | % | P у готовій сталі | 0,002-0,038 |
| | x10 | % | C у готовій сталі | 0,28-0,37 |
| | x11 | % | Mn у FeMn | 68,5-79,2 |
| | x12 | % | Mn у SiMn | 66,2-74,9 |
| | x13 | % | Si у FeMn | 0,41-2,8 |
| | x14 | % | Si у SiMn | 16,67-18,2 |
| Цільові | z1 | кг | Необхідна кільк. FeMn | 0-1070 |
| | z2 | кг | Необхідна кільк. SiMn | 0-675 |
| | z3 | кг | Необхідна кільк. FeSi | 0-360 |

База знань для розробленої ІС ППР формується за наявною базою даних і представляється за допомогою продукційної моделі представлення знань, тобто системи правил «**ЯКЩО...**, **ТО...**».

Для спрощення викладання методики відновлення бази знань введемо наступні позначення. Маємо множину об'єктів:

$$I = \{i_1, i_2, \dots, i_j, \dots, i_n\}, \quad (5.6)$$

де i_j – об'єкт, що досліджується, тобто конвертерна плавка, $n = 1, \dots, 12039$.

Кожен об'єкт характеризується набором параметрів:

$$I_j = \{x_1, x_2, \dots, x_{14}, z_1, z_2, z_3\}, \quad (5.7)$$

де x_k – незалежні змінні, описані у табл. 5.5, на основі яких необхідно визначити значення залежних змінних z_m – кількості елементів-розкислювачів.

Кожна змінна x_k може приймати значення із деякої скінченної множини $C_k = \{c_{k1}, c_{k2}, \dots\}$, що представляє собою набір центральних значень відповідних термів (нечітких множин). Для змінних також вводяться елементи

скінченних множини C_m , при цьому самі z_m приймають значення на діапазоні дійсних чисел R . Для виділення правил вхідні та цільові змінні, що надходять у вигляді дійсних чисел, необхідно перетворити на дискретні. Цей процес має назву фазифікація.

Розглянемо процедуру відновлення правил поетапно.

Крок 1. Початкова вибірка даних ділиться у співвідношенні 2:1 [151]. Більша частина має назву навчальної вибірки і використовується для добування знань і побудови бази знань. Менша частина, що зветься тестовою вибіркою, використовується для перевірки адекватності роботи побудованої ІСППР. Поділ на вибірки в запропонованій технології самонавчання здійснюється випадковим чином, розмір датасетів навчальної та тестової вибірок становить відповідно 8026×17 та 4013×17 .

Крок 2. Для кожного вхідного та вихідного параметра формуються дискретні інтервали, що надалі характеризуються границями інтервалу та присвоєною міткою. Зв'язок між міткою і дійсними значеннями тої чи іншої базової шкали забезпечують трикутні нечіткі множини. Мітки називаються термами або значеннями лінгвістичної змінної й представляють собою вербальні характеристики типу «великий», «низький», «багато», «мало». Таким чином початкові змінні стають лінгвістичними змінними. Отримані інтервали із відповідними термами для кожного параметра наведені нижче (табл. 5.6).

Після проведення процедури фазифікації кожна лінгвістична змінна x_k та z_m буде мати множину можливих значень змінної відповідно C_k та C_m , що будуть скінченними. Саме для цих множин відновлюються правила виведення.

Оскільки змінні z_m залежать не тільки від незалежних параметрів, але й є взаємозалежними, то кожному сполученню їх лінгвістичних значень необхідно поставити у відповідність певний клас. За наявними даними таких класів виявилось $q = 34$, до них входять усі можливі сполучення термів вихідних змінних, які зустрілися у базі даних хоча б один раз. Розподіл класів та сполучень вихідних параметрів ілюструє табл. 5.7.

Таблиця 5.6 – Множини термів для вхідних та вихідних змінних

| Інтервал | Кількість | Терм | Інтервал | Кількість | Терм |
|----------------|-----------|--------------|---------------|-----------|-------------|
| x1 | | | x2 | | |
| <1622,7 | 1011 | Низьке | <0,135 | 1727 | Низьке |
| 1622,7-1652,09 | 5924 | Середнє | 0,135-0,185 | 2477 | Середнє |
| >1652,09 | 1091 | Високе | 0,185-0,255 | 2428 | Вище серед. |
| x3 | | | >0,255 | 1394 | Високе |
| <0,0315 | 1172 | Низьке | x4 | | |
| 0,0315-0,0375 | 1922 | Середнє | <0,0095 | 3414 | Низьке |
| 0,0375-0,0435 | 2616 | Вище серед. | 0,0095-0,0145 | 3375 | Середнє |
| >0,0435 | 2316 | Високе | >0,0145 | 1237 | Високе |
| x5 | | | x6 | | |
| <0,155 | 377 | Низьке | <0,075 | 2811 | Низьке |
| 0,155-0,215 | 900 | Нижче серед. | 0,075-0,095 | 5114 | Середнє |
| 0,215-0,275 | 2365 | Середнє | >0,095 | 101 | Високе |
| 0,275-0,335 | 2494 | Вище серед. | x7 | | |
| 0,335-0,395 | 1509 | Високе | <0,5727 | 1340 | Низьке |
| >0,395 | 381 | Дуже високе | 0,5727-0,6563 | 5433 | Середнє |
| x8 | | | >0,6563 | 1253 | Високе |
| <0,0284 | 1428 | Низьке | x9 | | |
| 0,0284-0,0416 | 5092 | Середнє | <0,0102 | 1151 | Низьке |
| >0,0416 | 1506 | Високе | 0,0102-0,0166 | 5712 | Середнє |
| x10 | | | >0,0166 | 1163 | Високе |
| <0,295 | 1025 | Низьке | x11 | | |
| 0,295-0,325 | 4383 | Середнє | <73,85 | 2020 | Низьке |
| >0,325 | 2618 | Високе | 73,85-77,75 | 4188 | Середнє |
| x12 | | | >77,45 | 1818 | Високе |
| <68,765 | 636 | Низьке | x13 | | |
| 68,765-73,8 | 6683 | Середнє | <0,805 | 628 | Низьке |
| >73,8 | 707 | Високе | 0,805-2,4 | 6057 | Середнє |
| x14 | | | >2,4 | 1341 | Високе |
| <17,85 | 3050 | Низьке | z2 | | |
| 17,85-18,05 | 1123 | Середнє | <307,5 | 2533 | Мало |
| >18,05 | 3853 | Високе | 307,5-349,5 | 3914 | Середнє |
| Z1 | | | 349,5-452,5 | 1395 | Вище серед. |
| 0 | 327 | Нічого | >452,5 | 184 | Багато |
| 0-80,5 | 1521 | Мало | z3 | | |
| 80,5-118,5 | 2120 | Середнє | 0 | 7987 | Нічого |
| 118,5-156,5 | 2605 | Вище серед. | 0-27,5 | 16 | Середнє |
| >156,5 | 1453 | Багато | >27,5 | 23 | Багато |

Таблиця 5.7 – Розподіл сполучень значень цільових змінних на класи (фрагмент)

| Клас | z1 | z2 | z3 | Ймовірність | Потужність |
|-------------|-------------|-------------|-----------|--------------------|-------------------|
| 1 | Вище серед. | Середнє | Нічого | 0.1549 | 1243 |
| 2 | Середнє | Середнє | Нічого | 0.1363 | 1094 |
| 3 | Вище серед. | Мало | Нічого | 0.1236 | 992 |
| 4 | Мало | Середнє | Нічого | 0.0971 | 779 |
| 5 | Багато | Мало | Нічого | 0.0851 | 683 |
| 6 | Багато | Середнє | Нічого | 0.0758 | 608 |
| 7 | Середнє | Мало | Нічого | 0.0654 | 525 |
| 8 | Середнє | Вище серед. | Нічого | 0.0556 | 446 |
| 9 | Мало | Вище серед. | Нічого | 0.048 | 385 |
| 10 | Вище серед. | Вище серед. | Нічого | 0.0425 | 341 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |

У табл. 5.8 і 5.9 наведено фрагмент початкового набору даних (10 плавок) та ті ж самі дані, але після виконання кроку 2.

Таблиця 5.8 – Фрагмент навчального набору даних (до фазифікації)

| x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | x8 | x9 | x10 | x11 | x12 | x13 | x14 | z1 | z2 | z3 |
|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-----|-----|----|
| 1650 | 0,3 | 0,05 | 0,01 | 0,17 | 0,07 | 0,56 | 0,046 | 0,012 | 0,3 | 79 | 74,9 | 2,8 | 17,6 | 0 | 370 | 0 |
| 1635 | 0,24 | 0,045 | 0,018 | 0,19 | 0,07 | 0,56 | 0,041 | 0,019 | 0,3 | 77 | 73 | 2 | 18,2 | 60 | 300 | 0 |
| 1644 | 0,28 | 0,042 | 0,015 | 0,35 | 0,08 | 0,65 | 0,034 | 0,015 | 0,34 | 71,2 | 71,7 | 1,8 | 17,7 | 124 | 285 | 0 |
| 1605 | 0,26 | 0,046 | 0,015 | 0,22 | 0,08 | 0,63 | 0,04 | 0,014 | 0,29 | 71,2 | 71,2 | 1,8 | 17,7 | 114 | 314 | 0 |
| 1608 | 0,18 | 0,047 | 0,012 | 0,3 | 0,07 | 0,54 | 0,042 | 0,011 | 0,28 | 76,5 | 66,33 | 0,41 | 17,21 | 125 | 345 | 0 |
| 1677 | 0,14 | 0,03 | 0,01 | 0,25 | 0,09 | 0,65 | 0,034 | 0,013 | 0,31 | 79,2 | 74,4 | 1,8 | 16,8 | 170 | 326 | 5 |
| 1611 | 0,21 | 0,029 | 0,007 | 0,34 | 0,07 | 0,58 | 0,029 | 0,009 | 0,28 | 79 | 73 | 2,8 | 18 | 75 | 295 | 0 |
| 1635 | 0,21 | 0,031 | 0,011 | 0,28 | 0,08 | 0,6 | 0,034 | 0,013 | 0,28 | 76,5 | 66,33 | 0,41 | 17,21 | 90 | 310 | 0 |
| 1644 | 0,14 | 0,05 | 0,008 | 0,3 | 0,07 | 0,57 | 0,047 | 0,013 | 0,3 | 77 | 73 | 2 | 18,2 | 150 | 320 | 0 |
| 1620 | 0,15 | 0,033 | 0,012 | 0,4 | 0,08 | 0,62 | 0,032 | 0,017 | 0,35 | 79 | 73 | 2,8 | 18 | 105 | 360 | 0 |

Таблиця 5.9 – Фрагмент навчального набору даних (значення лінгвістичних змінних)

| x1 | x2 | x3 | x4 | x5 | x6 | x7 | x8 | x9 | x10 | x11 | x12 | x13 | x14 | Клас |
|--------|-------------|-------------|--------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| Серед. | Високе | Високе | Серед. | Нижче середнього | Низьке | Низьке | Високе | Серед. | Серед. | Високе | Високе | Високе | Низьке | 15 |
| Серед. | Вище серед. | Високе | Високе | Нижче середнього | Низьке | Низьке | Серед. | Високе | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Високе | 9 |
| Серед. | Високе | Вище серед. | Високе | Високе | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Високе | Низьке | Серед. | Серед. | Низьке | 8 |
| Низьке | Високе | Високе | Високе | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Низьке | Низьке | Серед. | Серед. | Низьке | 6 |
| Низьке | Серед. | Високе | Серед. | Вище сер. | Низьке | Низьке | Високе | Серед. | Низьке | Серед. | Низьке | Низьке | Низьке | 2 |
| Високе | Серед. | Низьке | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Високе | Високе | Серед. | Низьке | 16 |
| Низьке | Вище серед. | Низьке | Низьке | Високе | Низьке | Серед. | Серед. | Низьке | Низьке | Високе | Серед. | Високе | Серед. | 9 |
| Серед. | Вище серед. | Низьке | Серед. | Вище сер. | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Низьке | Серед. | Низьке | Низьке | Низьке | 6 |
| Серед. | Серед. | Високе | Низьке | Вище сер. | Низьке | Низьке | Високе | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Серед. | Високе | 2 |
| Низьке | Серед. | Серед. | Серед. | Дуже вис. | Серед. | Серед. | Серед. | Високе | Високе | Високе | Серед. | Високе | Серед. | 7 |

Крок 3. Безпосередня побудова правил. Для усіх класів, отриманих після виконання кроку 2, визначається їх ймовірність, тобто відношення кількості об'єктів із навчальної вибірки, для яких $z = c_r$, до загальної кількості об'єктів у даній виборці (стовпець «Ймовірність» в табл 5.7). Для зручності подальших розрахунків для цільових змінних одразу знаходиться центральне значення кожного терму, що розраховується як математичне очікування випадків, які потрапили до відповідного інтервалу (табл. 5.10).

Таблиця 5.10 –Центральні значення термів навчальної вибірки

| Терм | Центральне значення |
|-----------------|---------------------|
| z1 | |
| Нічого | 0 |
| Мало | 60,94 |
| Середнє | 100,38 |
| Вище середнього | 136,71 |
| Багато | 176,74 |
| z2 | |
| Мало | 292,84 |
| Середнє | 322,87 |
| Вище середнього | 375,87 |
| Багато | 533,55 |
| z3 | |
| Нічого | 0 |
| Середнє | 11,31 |
| Багато | 46,52 |

Далі визначаються ймовірності $P(z = c_r)$ за умови, що кожна вхідна змінна x_k приймає деяке значення c_{kh} із множини можливих значень C_k :

$$P(x_k = c_{kh} | z = c_r) = \frac{P(x_k = c_{kh} | z = c_r)}{P(z = c_r)}, \quad (5.8)$$

тобто дорівнює відношенню кількості об'єктів у навчальній виборці, для яких $x_k = c_{kh}$ та $z = c_r$, до кількості об'єктів, для яких $z = c_r$.

Таким чином отримуємо систему правил вигляду

$$\text{Якщо } x_k = c_{kh}, \text{ то } z = c_r \quad (5.9)$$

де ймовірність застосовності кожного правила визначається формулою (5.8). Отримана таким чином база знань містить усі можливі поєднання значень вхідних лінгвістичних змінних й усіх ідентифікованих класів використання розкислювачів. Для розглянутого прикладу вона нараховує 1598 правил першого рівня. Фрагмент бази знань ілюструє табл. 5.11, де кожен рядок відповідає умові за (5.9), а стовпчик – висновку «то $z = c_r$ ». На перетині стовпця і рядка знаходиться ймовірність відповідного правила за (5.8).

Елементом інформаційної технології, а саме модуля «Плавка.Розкислення» є користувацький інтерфейс, що ілюструється рис. 5.11.

Дані для розрахунку

Введіть дані хімічного складу сталі

| Після продувки | Бажаний результат |
|----------------|-------------------|
| Mn | Si 0,1 |
| S | Mn 0,65 |
| P | S 0,04 |
| C | P 0,03 |
| | C 0,325 |

Хімічний склад феросплаву

| | Mn | Si |
|------|----|----|
| FeMn | | |
| SiMn | | |

Температура металу
 *C

Розрахувати

Вихід

Рис. 5.11. Інтерфейс оператора ІС ППР модуля «Плавка.Розкислення»

Оператор заповнює відповідні поля, згідно із даними проведеного хімічного аналізу металу після процесу продувки. Поля у групі «Бажаний результат» за умовчанням заповнені згідно із діючим ДСТУ для марки сталі, що розливається, але оператор має змогу редагувати запропоновані системою значення.

Таблиця 5.11 –База правил інтелектуальної СППР та їх ймовірності (фрагмент)

| Клас | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | ... |
|------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| x1 | Низьке | 0,103 | 0,141 | 0,122 | 0,068 | 0,164 | ... |
| | Середнє | 0,755 | 0,739 | 0,749 | 0,750 | 0,734 | ... |
| | Високе | 0,142 | 0,121 | 0,130 | 0,182 | 0,102 | ... |
| x2 | Низьке | 0,010 | 0,209 | 0,015 | 0,000 | 0,556 | ... |
| | Середнє | 0,104 | 0,440 | 0,229 | 0,011 | 0,368 | ... |
| | Вище середнього | 0,422 | 0,306 | 0,472 | 0,085 | 0,072 | ... |
| | Високе | 0,463 | 0,045 | 0,284 | 0,903 | 0,003 | ... |
| x3 | Низьке | 0,175 | 0,121 | 0,181 | 0,182 | 0,067 | ... |
| | Середнє | 0,249 | 0,226 | 0,312 | 0,199 | 0,163 | ... |
| | Вище середнього | 0,344 | 0,319 | 0,318 | 0,375 | 0,329 | ... |
| | Високе | 0,232 | 0,333 | 0,189 | 0,244 | 0,441 | ... |
| x4 | Низьке | 0,158 | 0,504 | 0,335 | 0,045 | 0,755 | ... |
| | Середнє | 0,521 | 0,422 | 0,526 | 0,347 | 0,212 | ... |
| | Високе | 0,321 | 0,075 | 0,139 | 0,608 | 0,033 | ... |
| x5 | Низьке | 0,023 | 0,054 | 0,029 | 0,028 | 0,109 | ... |
| | Нижче середнього | 0,087 | 0,119 | 0,101 | 0,125 | 0,113 | ... |
| | Середнє | 0,291 | 0,308 | 0,267 | 0,273 | 0,321 | ... |
| | Вище середнього | 0,320 | 0,327 | 0,328 | 0,290 | 0,268 | ... |
| | Високе | 0,214 | 0,146 | 0,219 | 0,239 | 0,155 | ... |
| | Дуже Високе | 0,064 | 0,046 | 0,057 | 0,045 | 0,035 | ... |
| x6 | Низьке | 0,386 | 0,307 | 0,427 | 0,347 | 0,296 | ... |
| | Середнє | 0,603 | 0,688 | 0,573 | 0,653 | 0,701 | ... |
| | Високе | 0,010 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,003 | ... |
| x7 | Низьке | 0,208 | 0,130 | 0,179 | 0,188 | 0,079 | ... |
| | Середнє | 0,629 | 0,696 | 0,695 | 0,619 | 0,691 | ... |
| | Високе | 0,163 | 0,174 | 0,126 | 0,193 | 0,230 | ... |
| x8 | Низьке | 0,198 | 0,139 | 0,274 | 0,244 | 0,092 | ... |
| | Середнє | 0,687 | 0,619 | 0,623 | 0,631 | 0,590 | ... |
| | Високе | 0,116 | 0,241 | 0,103 | 0,125 | 0,317 | ... |
| x9 | Низьке | 0,039 | 0,151 | 0,101 | 0,011 | 0,298 | ... |
| | Середнє | 0,692 | 0,776 | 0,768 | 0,511 | 0,671 | ... |
| | Високе | 0,270 | 0,072 | 0,131 | 0,477 | 0,031 | ... |
| x10 | Низьке | 0,139 | 0,131 | 0,126 | 0,159 | 0,123 | ... |
| | Середнє | 0,582 | 0,537 | 0,583 | 0,528 | 0,535 | ... |
| | Високе | 0,280 | 0,331 | 0,291 | 0,313 | 0,342 | ... |
| x11 | Низьке | 0,073 | 0,249 | 0,411 | 0,045 | 0,298 | ... |
| | Середнє | 0,721 | 0,564 | 0,379 | 0,830 | 0,515 | ... |
| | Високе | 0,205 | 0,187 | 0,210 | 0,125 | 0,188 | ... |
| x12 | Низьке | 0,073 | 0,042 | 0,036 | 0,063 | 0,053 | ... |
| | Середнє | 0,915 | 0,918 | 0,964 | 0,938 | 0,699 | ... |
| | Високе | 0,012 | 0,040 | 0,000 | 0,000 | 0,248 | ... |
| x13 | Низьке | 0,073 | 0,042 | 0,036 | 0,063 | 0,053 | ... |
| | Середнє | 0,774 | 0,813 | 0,804 | 0,886 | 0,859 | ... |
| | Високе | 0,153 | 0,145 | 0,160 | 0,051 | 0,089 | ... |
| x14 | Низьке | 0,154 | 0,304 | 0,448 | 0,108 | 0,484 | ... |
| | Середнє | 0,146 | 0,140 | 0,160 | 0,051 | 0,041 | ... |
| | Високе | 0,700 | 0,556 | 0,392 | 0,841 | 0,475 | ... |

Для параметрів S_i , M_n та C з бази даних «Стандарти» підтягуються значення, що відповідають серединам інтервалів допустимих коливань даних параметрів за стандартом. Для S та P задається лише верхня межа. Після натискання кнопки «Розрахувати» активізується механізм логічного виведення, який складається з наступних етапів.

Етап 1. Значення введених параметрів x_k на основі табл. 5.8 перетворюються на значення лінгвістичної змінної, тобто кожна змінна отримує свій терм.

Етап 2. За побудованою раніше базою правил розраховується функція приналежності даного набору вхідних даних до кожного із q ідентифікованих класів (в розглянутому прикладі $q = 34$). Для підрахунку використовується формула Байєса для визначення апостеріорних ймовірностей, що складають повну групу несумісних подій, за їх апріорними ймовірностями:

$$\mu(c_r) = \frac{P(z = c_r) \cdot \prod_{k=1}^n P(x_k = c_{k,h})}{\sum_{r=1}^q [P(z = c_r) \cdot \prod_{k=1}^n P(x_k = c_{k,h})]} \quad (5.10)$$

де $r = 1, \dots, q$, q – кількість вихідних класів; $P(z = c_r)$ – апріорні ймовірності класів, знаходяться із табл. 5.8; $P(x_k = c_{k,h})$ – апріорні ймовірності термів для вхідних змінних, за табл. 5.12.

З використанням виразу (5.10) розраховуються функції приналежності для комплексних правил виведення вигляду

$$R_c: x_1 = c_{1,h} \dots \wedge x_k = c_{k,h}, \rightarrow z = c_r \quad (5.11)$$

для усіх q класів. Загальна кількість правил виду (5.11), що з достовірністю $P_\Sigma = 1$ описують зазначену предметну область розглянутого вище набору даних – 1589. При збільшенні кількості марок сталі, що виплавляються в однакових умовах, ця кількість може зростати до 7-9 тисяч.

Деффазифікація нечітких розв'язків у чіткі виконується за допомогою формули

$$z_m = \sum_{r=1}^q \mu(c_r) \cdot c_{m,r}, \quad m = \overline{1,3} \quad (5.12)$$

де $c_{m,r}$ – центральне значення кожного терму, що позначає необхідну масу m –того феросплаву.

На практиці оператор конвертерного цеху після завершення продувки і отримання хімічного аналізу плавки отримує на екрані пропозицію ввести певну кількість тих чи інших розкислювачів з точністю до 1 кг у вигляді, який ілюструє рис. 5.12.

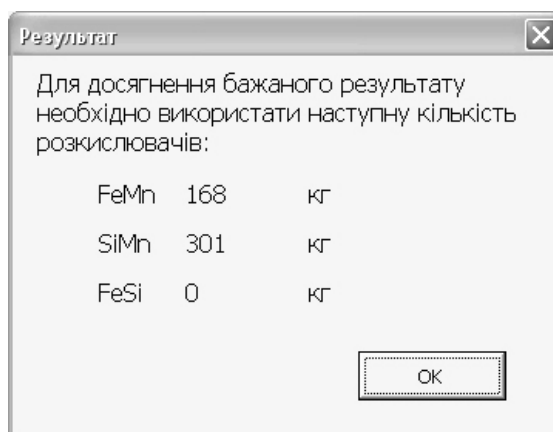


Рис. 5.12. Інтерфейс з рекомендацією використання феросплавів

Як і в попередніх операціях, оператор може прийняти рекомендацію, так і обрати інше сполучення розкислювачів виходячи з власного досвіду та особливостей ходу процесу. В обох випадках, прийняте рішення записується в базу даних «Плавки».

5.5 Висновки до розділу 5

1. Структура інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування виробництвом сортового прокату з конвертерним способом виготовлення сталі враховує перелік інтегрованих процесів та наявні джерела

даних. Система містить сім програмних модулів і використовує шість баз даних, кожна з яких відповідає окремому підрозділу підприємства та містить відповідні дані. Для кожного програмного модуля визначна структура вхідної та вихідної інформації.

2. Всі обчислювальні, оптимізаційні та рекомендаційні процеси відбуваються у окремих модулях СППР, кожен з яких передбачає, крім організації інтерфейсу вводу-виводу, розв'язання певної задачі, математичні постановки яких і підходи до вирішення описані в попередніх розділах. Взаємодія модулів та баз даних відбувається за методикою, заснованою на принципі паралельної обробки замовлення підприємством на різних етапах багатоетапного виробництва. Запропонований підхід дозволяє значно скоротити середній час виконання одного замовлення, узгодити окремі ділянки за пропускною здатністю, зменшити кількість переналаштувань, скоротити кількість незавершеного виробництва і як наслідок – зменшити собівартість продукції.

3. Робота кожного модуля інтегрованої СППР виробництва прокату визначається природою процесів, в яких здійснюється керування, насамперед їх відношенням до часу. Всі модулі, пов'язані з плавкою, розливкою та розкроюванням, працюють в реальному часі, супроводжуючи швидкоплинні процеси рафінації, розкислення, розливки та розкроювання передільної заготовки. Водночас модулі планування виконання замовлень, шихтування та контролю якості футеровки мають для виконання своїх завдань певний запас часу, відтак мають забезпечувати максимальну прийнятну точність отриманих рішень.

4. Підсистеми інтелектуального навчання на прикладах в складі інтегрованої СППР використовують наступні механізми навчання:

– для керування процесом рафінації сталі - на основі шаблону поведінки, синтезованого за найбільш вдалим попередніми діями, що максимально співпадають з поточними вхідними даними;

– для керування процесом розкислення сталі - на основі мережі Байєса з корекцією на поведінку людини.

5. Всі результати роботи окремих модулів розробленої інтегрованої СППР виводяться через відповідні інтерфейси і носять рекомендаційний характер.

6. ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ СППР В ПРОЦЕСАХ КЕРУВАННЯ БАГАТОЕТАПНИМ ВИРОБНИЦТВОМ ПРОКАТУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ВЕРИФІКАЦІЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДІВ

6.1 Дослідження ефективності СППР в задачах планування виконання замовлень на прокатну продукцію

Як зазначалося раніше, багатокритеріальна задача, що описується рівняннями (2.2)–(2.10), передбачає прийняття рішень про формування послідовності виконання замовлень, що надходять до металургійного виробництва. Альтернативами, які оцінюються за зведеним критерієм мінімуму сукупних додаткових втрат від виробничої діяльності (2.5), є послідовності обслуговування замовлень s_j . Розглянута задача може бути вирішена як комбінаторна задача побудови незамкненого маршруту руху комівояжера [161].

Для розв'язання задачі комівояжера традиційно використовуються як точні, так і наближені методи. Оскільки задача є NP-складною, починаючи з певної межі використання точних алгоритмів, які передбачають повний перебір варіантів, ускладнено [162], то як альтернатива може бути запропонований мурашиний алгоритм (ant colony optimization – ACO), який складається з чотирьох основних кроків [163]: створення пошукових агентів, пошуку рішення, оновлення феромону та додаткової дії (опціонально).

Опускаючи докладний опис відомого алгоритму, зазначимо, що в одній з його версій [162] після того, як був побудований маршрут, отримане рішення може бути додатково покращено одним із методів локальної оптимізації, найчастіше методами Ліна-Кернігана, що мають назву 2 – *opt* та 3 – *opt* [18].

В одній з найпродуктивніших версій мурашиного алгоритму (Min-Max Ant System, MMAS) підвищення концентрації феромонів відбувається тільки на кращих шляхах з пройдених мурахами [163], що дозволяє ефективно захистити

алгоритм від передчасної збіжності до субоптимальних рішень. Після кожної ітерації алгоритму лише один мураха залишає за собою слід. Цим єдиним може бути як кращий на поточній ітерації $L^{best}(t) = L^{ib}(t)$ або ж найбільш успішний за весь час роботи алгоритму $L^{best}(t) = L^{gb}(t)$. Автори [163] пропонують доволі складний механізм переходу від $L^{ib}(t)$, що переважно використовується на перших ітераціях до $L^{gb}(t)$ – на останніх. Застосування останнього дозволяє плавно змінювати технологію глобального пошуку на початкових кроках та технологію елітизму на заключних.

Іншим механізмом, що унеможливорює передчасну збіжність алгоритму є оператор диверсифікації [164]. Він використовується через кожні t_{max} або t_{max} ітерацій і полягає в повторній ініціалізації феромону на всіх ребрах в разі, якщо за час з останньої ініціалізації не сталося покращання глобального кращого рішення. При ініціалізації концентрація феромонів на всіх ребрах встановлюється рівною максимальному значенню, що визначається за формулою через коефіцієнт випаровування і поточне оптимальне рішення.

Модифікований з урахуванням викладеного алгоритм розв'язання задачі планування обробки замовлень, докладно розглянутий в [165], був застосований для вирішення низки задач різної розмірності й складності як теоретичних, так і практичних.

В ході практичного застосування математичної моделі планування виконання замовлень були розв'язані різні за природою задачі календарного планування виконання замовлень трьох металургійних підприємств Дніпропетровщини:

– «ІС-місяць» – задача планування місячної виплавки сталевих заготовок на заводі «Інтерпайп-сталь» – загалом 103 замовлення, різні за логічним поєднанням продукції та замовника (14 марок сталі, 6 діаметрів, 21 довжина);

– «НТЗ-місяць» – задача планування місячного виробництва безшовних труб трубопрокатним цехом №4 ПАТ «Інтерпайп-НТЗ» – 215 замовлень (81 діаметр, 32 товщини, 19 марок сталі);

– «ДМЗ-тиждень» – задача планування тижневого виробництва сортового прокату ПАТ «ДМЗ» – 44 замовлення (21 вид прокату, 4 марки сталі, 12 типорозмірів передільної заготовки).

У таблиці 6.1 представлені результати розв’язання задачі комівояжера у закритому варіанті (всі замовлення, що надходять, мають бути виконані). Інакше кажучи, результати роботи алгоритмів у табл. 6.1 показують їх відносну один до одного ефективність щодо розв’язання симетричної задачі TSP. В першому стовпчику для порівняння наведене рішення, яке було отримане за існуючими на підприємствах методиками планування (без застосування жодних оптимізаційних обчислювальних алгоритмів). Дані усереднені за підсумками 10 повторних запусків еволюційних алгоритмів.

Таблиця 6.1. Найкращий час виконання всіх можливих замовлень, хв., отриманий різними методами

| Задача | Традиційне рішення | Генетичний алгоритм | MMAS | MMAS+2-opt |
|-------------|--------------------|---------------------|-------|------------|
| ІС-місяць | 32580 | 30006 | 29712 | 28833 |
| НТЗ-місяць | 30230 | 27560 | 26198 | 25997 |
| ДМЗ-тиждень | 12725 | 12110 | 11278 | 11033 |

Аналізуючи результати в таблиці 6.1, слід зауважити що застосування будь-якого еволюційного обчислювального алгоритму для планування тижневих або місячних замовлень забезпечує зменшення планового часу виконання всіх замовлень на 5-14% у порівнянні з існуючими методиками. При цьому запропонований алгоритм моделювання мурашиної колонії з обмеженням на мінімальний та максимальний рівень феромону та ймовірним локальним пошуком показує найкращі результати в порівнянні з іншими еволюційними алгоритмами.

Слід враховувати, що результати в таблиці 6.1 можуть бути застосовані виключно як показники ефективності алгоритмів. Виконання усіх замовлень, що

надійшли і були включені до переліку, за яким виконувалось планування, було неможливим через обмеження ресурсу робочого часу. В розглянутих наборах даних це обмеження складало: для місячного планування при двозмінній роботі – на рівні 23 040 хвилин, для тижневого при тризмінній роботі – 10 080 хвилин.

Надалі було виконано розв'язання задачі оптимального календарного планування (2.3) з урахуванням обмежень за запропонованим узагальненим економічним критерієм (2.5) та складовими цільової функції (2.6)-(2.10) з використанням запропонованого модифікованого алгоритму моделювання колонії мурах. Результати, усереднені за підсумками 10 повторних запусків еволюційних алгоритмів по 10 запусках наведено в табл. 6.2, де порівнюються з рішенням, прийнятим за традиційною методикою.

Таблиця 6.2. Витрати за виконання замовлень з переліку за обмежений час за зведеним критерієм (2.5), тис. грн

| Задача | Існуюче рішення | Генетичний алгоритм | MMAS | MMAS+2-opt |
|-------------|-----------------|---------------------|--------|------------|
| ІС-місяць | 3959,6 | 3901,2 | 3788,5 | 3688,4 |
| НТЗ-місяць | 3873,3 | 3792,5 | 3777,3 | 3693,0 |
| ДМЗ-тиждень | 529,6 | 512,2 | 495,3 | 482,2 |

З результатів, наведених у таблиці 6.2, можна побачити, що застосування кожного з еволюційних обчислювальних алгоритмів для планування тижневих або місячних замовлень за запропонованою математичною моделлю з урахуванням обмежень забезпечує зменшення зведеного критерію сукупних втрат на 2-9% у порівнянні з методиками планування, що традиційно застосовуються на виробництвах. При цьому запропонований алгоритм MMAS+2-opt забезпечує в середньому кращі результати в порівнянні з іншими еволюційними алгоритмами.

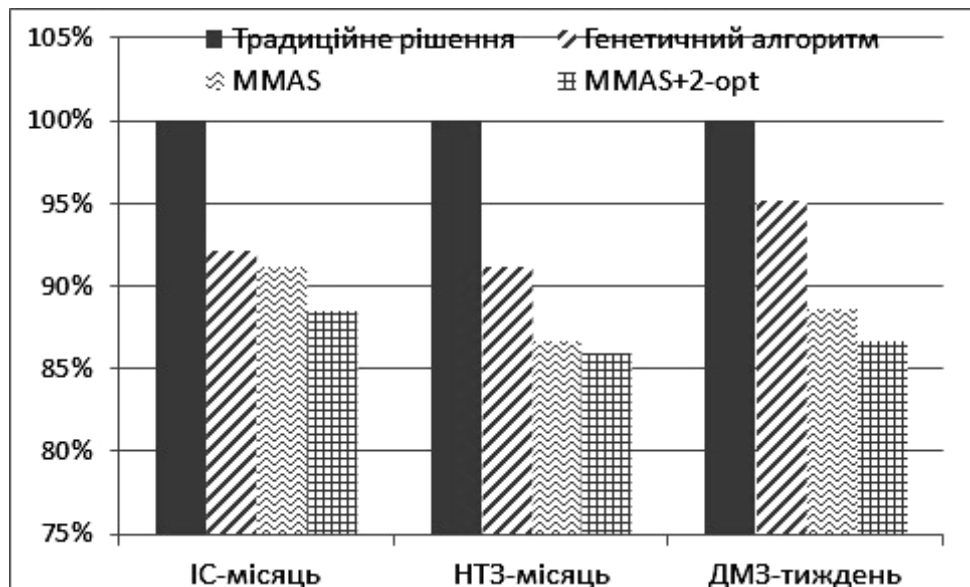


Рис. 6.1. Порівняна ефективність алгоритмів за критерієм мінімуму часу виконання всіх операцій

Значно краще дані, представлені у табл. 6.1 та 6.2, ілюструють графіки на рисунках 6.1 та 6.2, де наведені параметри виконання замовлень представлені у порівнянні з традиційною методикою, що застосовується на виробництві. Час виконання та сукупні витрати за зведеним критерієм (2.5) для кожного із розглянутих переліків замовлень, обчислені за традиційною методикою, взяті за 100%.

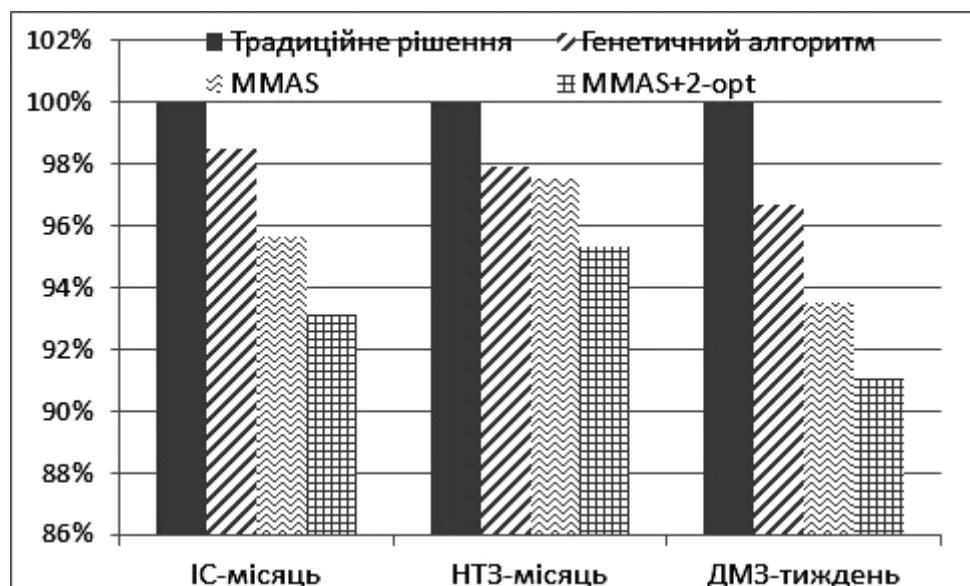


Рис. 6.2. Порівняна ефективність алгоритмів за зведеним економічним критерієм (2.5)

Графіки на рис. 6.1 та 6.2 показують, що на розглянутих підприємствах існує суттєвий ресурс часу, який використовується в неповній мірі через неоптимальний порядок виконання замовлень. Втім, якщо графік на рис. 6.1 показує, що запропонований алгоритм може знаходити кращий розв'язок узагальненої задачі TSP при заздалегідь визначеному переліку завдань, які треба впорядкувати, з економією часу до 14%, то графік на рис. 6.2 показує, що далеко не весь цей потенціал може бути використаний в умовах обмеження на робочий час. Пояснення цьому – у структурі обраного критерію оптимізації (2.5), де негативно на економічні показники діяльності підприємства впливають як завчасне виконання замовлень, так і порушення встановлених термінів.

Запропонована в розділі 2 математична модель задачі оптимізації, що включає чотири складові матеріальних витрат при виробництві на одному обладнанні великого сортаменту продукції, дозволяє мінімізувати сукупні витрати на виготовлення продукції при обмеженні на робочий час, використовуючи ресурс технологічного процесу на переналаштування обладнання, зменшення розривів часу між виготовленням та відвантаженням замовлень. При цьому в ході експериментальної перевірки було встановлено, що найбільший відносний ресурс скорочення витрат у сортопрокатного виробництва ПАТ «ДМЗ» (близько 9,5%), а найменший – у трубопрокатного виробництва ВАТ «Інтерпайп-НТЗ» (до 4,5%).

6.2 Верифікація моделей на основі зворотних залежностей в підсистемах сертифікації готової продукції

В розділі 3 запропоновано математичну модель відновлення залежностей керуючих функцій розкислення та стану об'єкта управління (механічні властивості готової продукції) від хімічного складу розпеченої сталі в кисневому конвертері. Відмінність запропонованої моделі від відомих аналогів полягає у

– використанні в регресійних моделях від’ємних ступенів предикторів, що дозволило не лише значно підвищити фізичну відповідність моделей сутності процесів, а й створити новий тип предикторів, а саме відношення параметрів, що описують фізичні характеристики процесу;

– застосуванні штрафної функції на розмірність апроксимаційного поліному, що дозволяє в підсумку отримувати моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації.

Запропонований підхід до побудови апроксимаційних функцій був перевірений на двох технологічних процесах виробництва прокату: відновлення залежності механічних характеристик готової продукції від хімічного складу та прогнозування необхідності у феросплавах в процесі розкислення вуглецевої сталі при її конвертерному виробництві.

В ході серії експериментів було відновлено ряд функціональних залежностей механічних характеристик та необхідних об’ємів розкислювачів при виробництві двох профілів готової продукції: швелерів 18П та профілю кутового шириною 125 мм.

Зведені результати чисельної апроксимації представлені у таблиці 6.3. Тут в якості «МНК» позначено результати застосування класичного підходу з незалежними поліномами від окремих параметрів за (1.2) – (1.3). У якості МГУА – результати застосування методу групового врахування аргументів на опорній функції другого порядку (1.5) з критерієм регулярності. Також в таблиці 6.3 наведені результати застосування генетичного алгоритму з цільовою функцією вигляду (3.12) та ступенями – натуральними числами (“ГА-натур”) і, відповідно – запропонованого методу генетичного алгоритму з цільовою функцією вигляду (3.12) та обмеженням (3.11) (“ГА-від’ємні”). В обох останніх випадках $m = 3$.

Таблиця 6.3. Порівняння результатів відновлення функцій за чотирма методиками.

| Задача | Функція | Кількість змінних | МНК | | | МГУА | | | ЕА-натур | | | ЕА-від'ємні | | |
|--------------|-------------------|-------------------|-----|-----------|------|------|-----------|------|----------|-----------|------|-------------|-----------|------|
| | | | М | S_{max} | SSR | М | S_{max} | SSR | М | S_{max} | SSR | М | S_{max} | SSR |
| Сертифікація | Границя текучості | 9 | 23 | 5 | 0,04 | 69 | 5 | 0,01 | 14 | 3 | 0,14 | 6 | 3 | 0,04 |
| | Границя міцності | 9 | 27 | 6 | 0,03 | 110 | 7 | 0,02 | 21 | 3 | 0,12 | 8 | 3 | 0,05 |
| | Відн. подовження | 9 | 21 | 5 | 0,06 | 76 | 6 | 0,02 | 15 | 3 | 0,15 | 4 | 3 | 0,09 |
| Розкислення | Феросиліцій | 14 | 43 | 5 | 0,11 | 166 | 5 | 0,03 | 17 | 3 | 0,23 | 11 | 3 | 0,11 |
| | Силікомарганець | 15 | 37 | 4 | 0,13 | 123 | 4 | 0,03 | 19 | 3 | 0,24 | 9 | 3 | 0,13 |

Оцінками якості роботи алгоритмів у наведеній таблиці є: M - кількість членів полінома функції апроксимації (кількість коефіцієнтів, що відновлюються); S_{max} - максимальна степінь члена поліному (для МНК – окремого аргументу, для всіх інших методів – добутку аргументів); SSR - середнє квадратичне відхилення апроксимованої величини від безпосередньо виміряного значення (оскільки різні функції y_k мають різну розмірність, використане відносне значення похибки, приведене до середнього по всім дослідом).

Як видно з таблиці 6.3, найкращу якість апроксимації забезпечує метод групового урахування аргументів, який водночас дає найбільшу кількість коефіцієнтів результуючого поліному. Недоліки такої апроксимації перелічені раніше. Застосування генетичного алгоритму відновлення коефіцієнтів функції апроксимації з обмеженням степені забезпечує прийнятну якість результатів при меншій кількості коефіцієнтів, ніж при використанні традиційної методики багатовимірної нелінійної регресії. Додатково слід відзначити, що використання від'ємних степенів у поліномах апроксимаційної функції дозволяє у два-три рази зменшити кількість коефіцієнтів, що відновлюються, при цьому помилка апроксимації також зменшується у 1,5 – 2,5 рази.

Ілюстрацією якості апроксимації може слугувати рисунок 6.3, де показані експериментальні дані та їх апроксимація за допомогою МГУА та ГА з використанням від'ємних степенів поліномів та тиску розмірності.

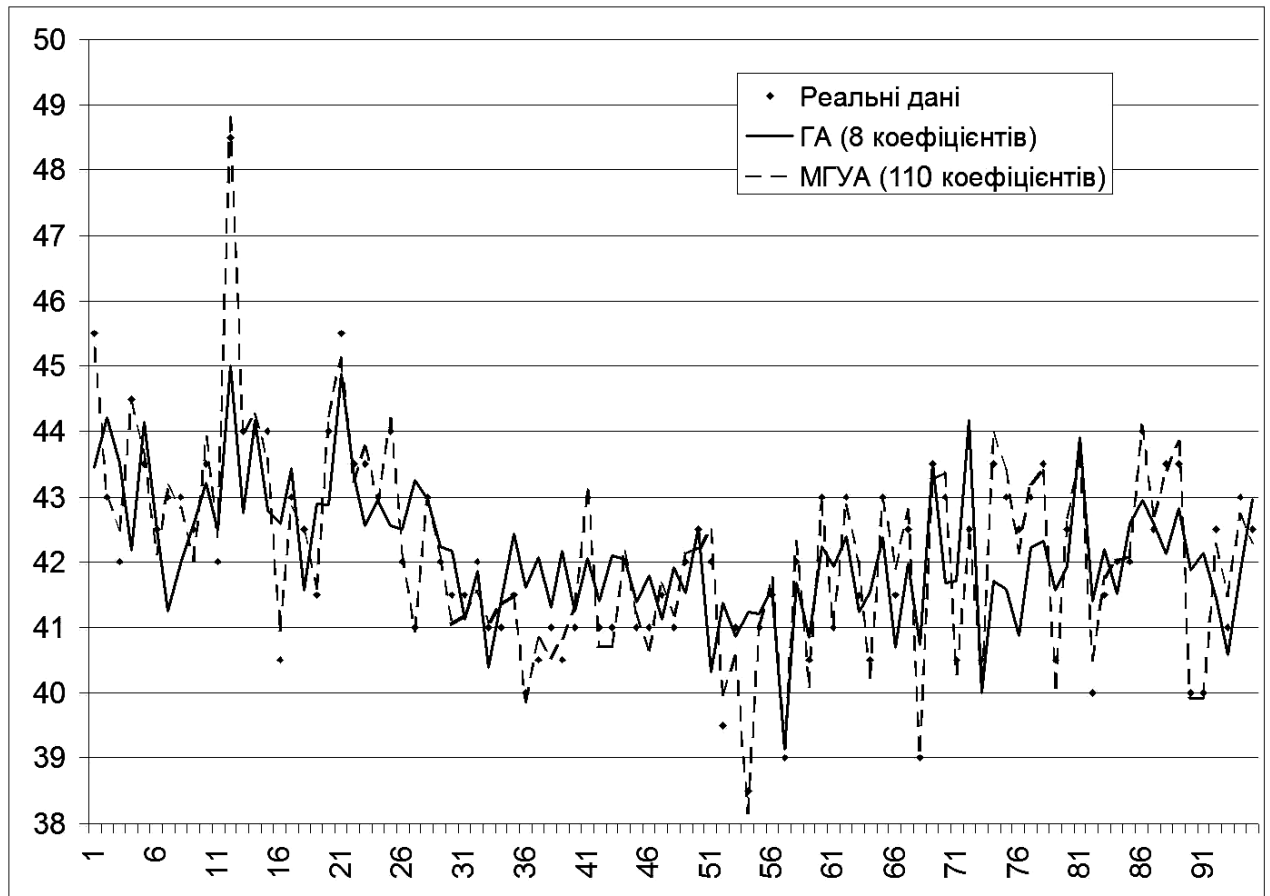


Рис. 6.3. Порівняння якості апроксимації залежності границі міцності сортового прокату від хімічного складу сталі (95 прикладів) двома методами.

Програмне забезпечення, що реалізує запропоновану методику відновлення коефіцієнтів апроксимуючого поліному, було реалізовано мовою Matlab. На рисунку 6.4 показаний результат апроксимації тієї ж таки функції границі міцності від хімічного складу сталі (пунктир - дані спостережень, суцільна – результати апроксимації усього вісьмома членами).

З рисунку видно, що похибка апроксимації присутня майже в усіх дослідях, втім, отримана апроксимаційна залежність поводить себе так само, як і реальні дані (пікам даних відповідають піки функції, западинам – западини). Це дозволяє стверджувати про прийнятність отриманої моделі для оцінки механічних властивостей готової продукції.

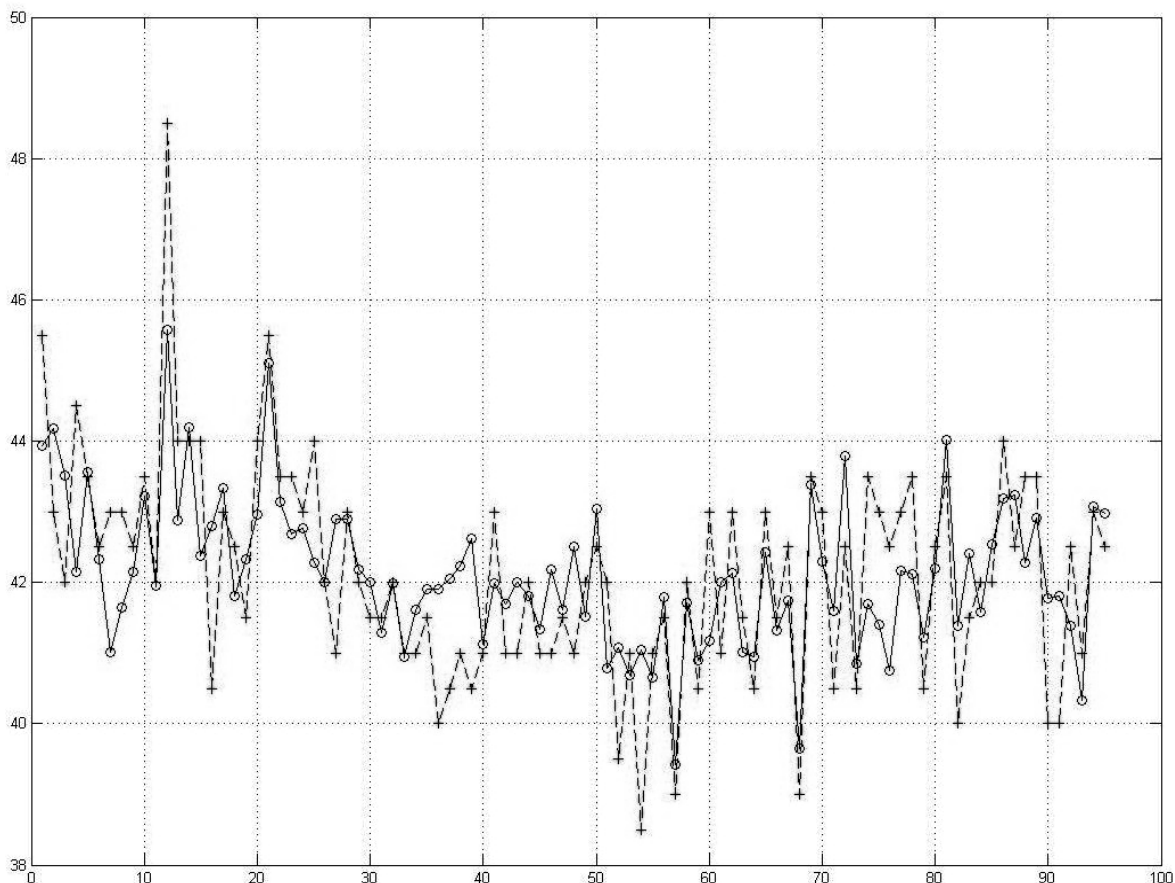


Рис. 6.4. Апроксимація залежності границі міцності сортового прокату від хімічного складу сталі (95 прикладів) з використанням генетичного алгоритму й обмеженням ступенів членів поліному.

Питання величини параметру тиску розмірності α є компромісом між бажанням отримати якомога простішу залежність, з меншою кількістю коефіцієнтів, та бажанням якомога точніше описати вхідні дані. Як видно з таблиці 6.9, застосування генетичного алгоритму з критерієм оптимізації, що включає складову тиску розмірності, далеко не завжди забезпечує середнє квадратичне відхилення функції від реальних даних, менше ніж 5%. Аби проілюструвати вплив величини α на результати апроксимації, було проведено ряд досліджень на одній з функцій (y_5 - відносне подовження зразку), результати якого наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4. Дослідження впливу тиску розмірності на результати апроксимації

| Величина α в (3.12) | Кількість членів апроксимаційного поліному M | Середня квадратична похибка апроксимації, SSR | Кількість ітерацій ЕА пошуку коефіцієнтів функції |
|----------------------------|--|---|---|
| 0 | 68 | 0,023 | 2740 |
| 0,001 | 33 | 0,0246 | 1230 |
| 0,01 | 22 | 0,026 | 330 |
| 0,05 | 15 | 0,034 | 216 |
| 0,1 | 8 | 0,051 | 189 |
| 0,2 | 6 | 0,075 | 234 |
| 0,3 | 4 | 0,09 | 716 |
| 0,5 | 3 | 0,21 | 1210 |

Аналізуючи результати, зведені у таблицю 6.4, слід відзначити, що величину у розмірності слід обирати не більшою за 0,1. Оскільки для функції, для якої була побудована залежність, будувався апроксимаційний поліном від $k = 9$ змінних, можна зробити припущення, що оптимальною величиною коефіцієнту, що досліджується, є $\alpha = 1/k$. Втім, подібне припущення потребує додаткової експериментальної перевірки на ширшому наборі даних, при різній кількості вхідних параметрів функцій та різному вигляді залежностей.

Також легко побачити, що при відсутності тиску розмірності $\alpha = 0$ результати відновлення функції забезпечують прийнятну похибку апроксимації, не гіршу за апроксимацію з допомогою МГУА, застосовуючи при цьому поліноми з порівняльною кількістю коефіцієнтів. Коли ж коефіцієнт тиску розмірності стає більшим від 0,1 одразу різко погіршується якість апроксимації, при тому що зменшення кількості коефіцієнтів уже відбувається несуттєво.

Привертає увагу також останній стовпчик таблиці 6.4, в якому наведені кількості кроків (поколінь) генетичного алгоритму, витрачені на пошук найкращого за критерієм (3.12) рішення. Очевидно, що при середніх значеннях $\alpha = 0,01 \dots 0,2$ найкращий поліном знаходиться набагато швидше, ніж при зависокому чи занизькому значенні α . Це свідчить про те, що оптимум при малих

чи навпаки надто великих значеннях параметру тиску розмірності знаходиться серед сотень близьких локальних оптимумів.

Результат апроксимації залежності відносного подовження від хімічного складу сталі (9 параметрів) при найкращому, на думку автора, значенні $\alpha = 0,1$ наведено на рисунку 6.5.

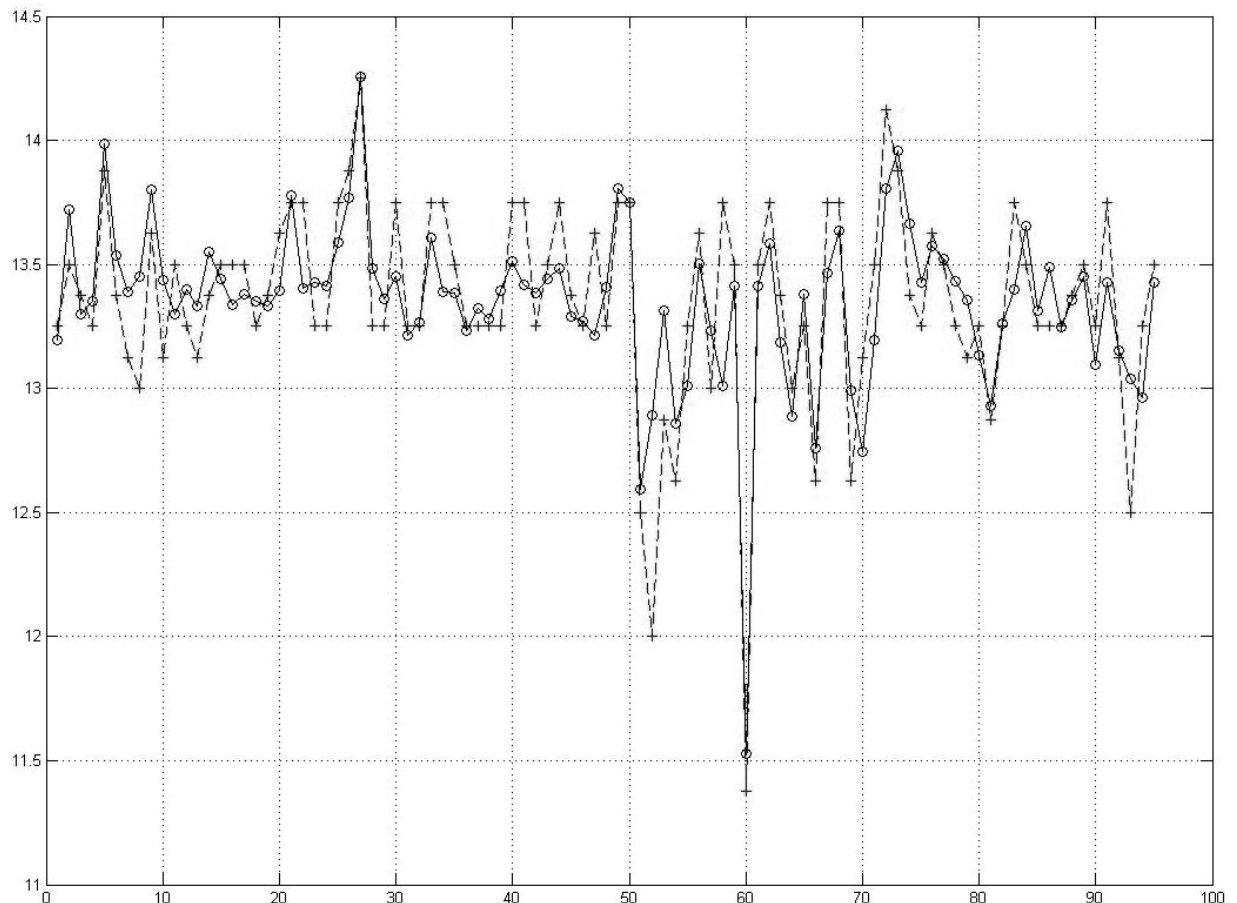


Рис. 6.5. Апроксимація залежності відносного подовження сталевого прокату від хімічного складу

Як можна побачити на цьому рисунку, при вказаному значенні α апроксимуюча функція достатньо якісно відтворює залежність, враховуючи ключові коливання та екстремуми.

Підсумовуючи викладене, можна зробити висновок, що запропонована математична модель побудови апроксимуючих поліноміальних функцій багатьох змінних, що описують певні характеристики металургійних процесів,

яка відрізняється від відомих раніше використанням у поліномах від'ємних степенів та застосуванням до поліномів обмеження на сумарну величину степені добутку змінних, дозволяє значно наблизити отримані апроксимаційні залежності до їх фізичного сенсу, та водночас знано спростити вигляд результуючих функцій, зменшивши кількість коефіцієнтів, що відновлюються.

В якості базового алгоритму розрахунку коефіцієнтів апроксимуючої функції використано метод найменших квадратів, в якості алгоритму пошуку найкращої структури функції – простий генетичний алгоритм з турнірним оператором селекції, рівномірним схрещуванням та гаусівською випадковою мутацією. Подібне сполучення алгоритму та його налаштувань дозволяє отримати залежності механічних властивостей в режимі реального часу (200-300 поколінь роботи алгоритму).

В результаті аналізу отриманих результатів практичної перевірки викладеного підходу до побудови апроксимуючої функції з використанням від'ємних степенів у поліномах апроксимаційної функції було з'ясовано, що його застосування дозволяє у 2–3 рази зменшити кількість коефіцієнтів, що відновлюються, при цьому середньоквадратична помилка апроксимації зменшується у 1,5–2,5 рази.

В результаті виконаної роботи оцінено оптимальну величину параметру тиску розмірності, запропонованого автором у якості штрафної функції критерію оптимізації. Запропоновано надалі користуватися значенням $\alpha \leq 0,1$, оскільки при більших значеннях неприпустимо зростає помилка апроксимації.

Практична цінність отриманого рішення полягає у можливості застосування викладеного підходу до синтезу і мінімізації моделей у складі загальної інтегрованої СППР керування металургійним виробництвом, а саме для відновлення залежностей механічних характеристик готової продукції від хімічного складу сталі до розкислення.

6.3 Дослідження гібридного методу моделювання ШС в задачах оптимізації

В шостому розділі роботи було запропоновано гібридний адаптивний метод розв'язання задач умовної та безумовної оптимізації в безкінечному та двійковому просторах на основі моделювання штучної імунної системи, що на відміну від відомих використовує оператор клональної селекції на основі методу парних порівнянь Сааті, адаптивний ймовірнісний кросинговер, адаптивні оператори мутації та стиснення популяції та обмежений локальний пошук.

В складі СППР прокатного виробництва розглядаються наступні оптимізаційні задачі:

1. Мінімізація витрати часу на виконання замовлень при широкому сортаменті;
2. Оптимізація ваги зливку з огляду на перебіг технологічного процесу в майбутніх переділах;
3. Оптимальне розкроювання заготовок прокатного виробництва;
4. Оптимізація шихти при конвертерному виробництві;
5. Відновлення функцій математичних моделей сертифікації готової продукції;
6. Прогнозування стійкості футеровки конвертера.

Якщо перша задача традиційно вирішується спеціально адаптованим для цього методом моделювання мурашиної колонії (докладно розглянуто в розділі 6.1), а шоста – традиційними методами множинної лінійної регресії та групового врахування аргументів (див. розділ 3.3), то решта задач можуть ідентифікуються як задачі комбінаторної або дійсночисельної оптимізації. Для їх розв'язання в складі запропонованої системи підтримки прийняття рішень пропонується застосовувати викладений вище алгоритм моделювання штучної імунної системи. Переваги та особливості застосування такого оптимізаційного алгоритму для різних задач ілюструють наступні результати.

Для оцінки якості методів оптимізації традиційно використовуються наступні показники [261]:

- якість рішення (в сенсі значення цільової функції на просторі можливих рішень),
- повторюваність рішення (в відносному значенні при кількох послідовних запусках для однієї й тієї ж задачі),
- складність отримання рішення (у кількості ітерацій або звернень до цільової функції).

Оскільки методи, що порівнюються надалі, мають суттєво різну структуру і фізичний час виконання однієї ітерації у них може відрізнитися на порядки, надалі пропонується використовувати саме показник кількості звернень до цільової функції, необхідних для обчислення значення, що є рішенням тієї чи іншої оптимізаційної задачі. Також важливо, наскільки цей показник стабільний, тому будемо оцінювати також його дисперсію.

В якості задач, обраних для рішення, розглядаємо:

1) *Замовлення1* – задача оптимізації використання металу при плануванні обробки невеликого замовлення загальним об'ємом 322,5 т;

2) *Замовлення2* – задача оптимізації планового виконання добового замовлення прокатної продукції, об'єм замовлення 1560 т;

3) *Розкрой1* – розкроювання зливка непрогнозованої довжини на передільні заготовки при великій кількості варіантів розкроювання – сталь ст3пс, продукція – профіль кутовий У75, міра готової продукції – 9 м.

4) *Розкрой2* – розкроювання зливка непрогнозованої довжини на передільні заготовки при малій кількості варіантів розкроювання – сталь ст3пс, продукція – швелер Ш14, міра готової продукції – 11,7 м.

5) *Шихта1* – шихтування плавки сталі 5пс при наявності всіх можливих необхідних складових домішок та охолоджувачів, чавун відповідає середнім показникам за технічними умовами;

6) Шихта2 – шихтування плавки сталі 5пс при обмежених можливостях використання розкислювачів та охолоджувачів, чавун відповідає середнім показникам за технічними умовами;

7) Шихта3 – шихтування плавки сталі 45 при наявності всіх можливих необхідних складових домішок та охолоджувачів, чавун має граничні припустимі характеристики, брухт стандартний;

8) Шихта4 – шихтування плавки сталі 45 при обмежених можливостях використання розкислювачів та охолоджувачів, чавун має граничні припустимі характеристики, брухт нестандартний;

9) Відновлення1 – відновлення залежності границі міцності сортового прокату від хімічного складу сталі, сталь 5пс, викиди в даних відсутні;

10) Відновлення2 – відновлення залежності границі текучості сортового прокату від хімічного складу сталі, сталь 5пс, в даних присутні викиди;

11) Відновлення3 – відновлення залежності відносного подовження сортового прокату при навантаженні від хімічного складу сталі, сталь 5пс, викиди в даних відсутні.

Всі задачі передбачають мінімізацію певної цільової функції. Для перших чотирьох задач вона вимірюється у відносних одиницях невикористаного металу (обрізків) та немірних заготовок; для задач шихтування – у гривневому еквіваленті вартості готового металу за тону; для задач відновлення залежностей цільова функція має сенс мінімуму помилки апроксимації при використанні мінімальної кількості невідомих.

В якості альтернативних методів для порівняння розглянуті:

- для комбінаторних задач розкроювання і відновлення залежностей – генетичний алгоритм з турнірним оператором селекції, рівномірним схрещуванням та гаусівською випадковою мутацією [73], а також метод імітації відпалу (simulated annealing) [74].

- для оптимізації в дійсному просторі (задача шихтування) – згаданий веж метод імітації відпалу та метод рою часток (particle swarm optimization) в нотації [75].

Порівняльні результати вирішення описаних вище задач згаданими методами при 50 повторних запусках з однаковими початковими даними зведені в таблицю 6.5.

Таблиця 6.5 - Порівняння методів рішення оптимізаційних задач за показниками якості

| Задача | GA / <i>PSO</i> | | | | Simulated Annealing | | | | HINO-SF | | | |
|-------------------------------|-----------------|---------------|-------------|--------------|---------------------|---------------|-------------|--------------|--------------|---------------|-------------|--------------|
| | $M\{F\}$ | $\sigma\{F\}$ | $P, \%$ | F_{best} | $M\{F\}$ | $\sigma\{F\}$ | $P, \%$ | F_{best} | $M\{F\}$ | $\sigma\{F\}$ | $P, \%$ | F_{best} |
| Замовлення1 | 12213 | 5943 | 76 | 1,0 | 10348 | 29 | 90 | 1,0 | 16150 | 625 | 100 | 1,0 |
| Замовлення2 | 31886 | 13068 | 34 | 1,109 | 10480 | 101 | 66 | 1,067 | 42053 | 9270 | 94 | 1,0 |
| Розкрой1 | 7494 | 52 | 96 | 1,0 | 10088 | 14 | 90 | 1,0 | 15597 | 837 | 96 | 1,0 |
| Розкрой2 | 5864 | 111 | 90 | 1,0 | 10057 | 7 | 100 | 1,0 | 6165 | 167 | 100 | 1,0 |
| Шихта1 | 36485 | 1342 | 14 | 1,0 | 10811 | 233 | 34 | 1,022 | 15537 | 538 | 78 | 1,022 |
| Шихта2 | 125013 | 1957 | 22 | 1,866 | 11077 | 409 | 4 | 1,184 | 15243 | 548 | 70 | 1,0 |
| Шихта3 | 93100 | 6074 | 36 | 1,358 | 11548 | 409 | 32 | 1,227 | 18376 | 698 | 88 | 1,0 |
| Шихта4 | 115859 | 11836 | 26 | 2,031 | 12324 | 568 | 42 | 1,884 | 15709 | 511 | 54 | 1,0 |
| Відновлення1 | 16868 | 686 | 12 | 1,040 | 10450 | 41 | 88 | 1,040 | 16888 | 577 | 100 | 1,0 |
| Відновлення2 | 19196 | 5393 | 16 | 1,088 | 10453 | 124 | 92 | 1,0 | 15849 | 1596 | 94 | 1,0 |
| Відновлення3 | 18194 | 3525 | 20 | 1,0 | 10860 | 255 | 66 | 1,0 | 16292 | 1890 | 100 | 1,167 |
| В середньому на задачу | 43834 | 4544 | 40,2 | 1,227 | 10772 | 199 | 64,0 | 1,129 | 17624 | 1569 | 88,5 | 1,017 |

В таблиці використані наступні умовні позначення: $M\{F\}$ – математичне очікування кількості звернень до цільової функції для отримання рішення, що не покращується в подальшому, разів; $\sigma\{F\}$ – стандартне відхилення цієї кількості звернень, разів; $P, \%$ - повторюваність рішення, відносна частка однакових кращих рішень при повторних запусках; F_{best} – відносне значення кращого рішення, що забезпечує даний метод, у порівнянні з іншими методами. Останнє значення перераховане до однакової для всіх відносної шкали, адже цільові

функції у різних задачах мають значення, що відрізняються на кілька порядків і не можуть бути порівняні.

Аналізуючи результати експериментів в таблиці 6.5, можна відзначити наступні особливості. По-перше, запропонований удосконалений метод оптимізації HINO-SF на основі моделювання штучної імунної системи має високу точність і повторюваність результатів при розв'язанні задач як в двійковому, так і в дійсному просторі пошуку рішення. Лише для двох задач з 11 знайдене ним рішення виявилось не найкращим в порівнянні з рішеннями, знайденими іншими методами. Фактично з ймовірністю більше 0,885 запропонований метод знаходить найкраще рішення з помилкою до 1,7%.

По-друге, для комбінаторних задач, зокрема, розкроювання передільних заготовок, де запропонований метод HINO-SF знаходить ті самі рішення, що й методи-конкуренти, повторюваність його кращого рішення зазвичай вища ніж у інших еволюційних методів. Мінімальний відсоток відтворення точного рішення для комбінаторних задач становить 94%, а для дійсного простору – 54%, що значно краще ніж у методів-конкурентів.

По-третє, для пошуку рішення в дійсному просторі метод HINO-SF використовує значно менше машинного часу ніж метод рою часток, поступаючись методу імітації відпалу. При цьому якість рішень для дійсного простору у запропонованого методу вища в середньому в 1,33 – 1,56 рази, а повторюваність – 2,6 – 3,0 рази.

Також до значних переваг методу розв'язання оптимізаційних задач HINO-SF слід віднести форму рішення, адже завдяки механізму стиснення популяції і усування близьких геномів-рішень, підсумкова популяція в даному методі містить набір субоптимальних рішень, відмінних одне від одного. Ця особливість дає змогу особі, що приймає рішення, переглянувши варіанти розв'язків, обрати рішення, можливо й не найкраще з точки зору глобального критерію оптимізації, але таке що є більш прийнятним за міркуваннями подальшого технологічного процесу.

Іншою ілюстрацією переваги методу оптимізації на основі моделювання ШС є рисунок 6.6, де показано переважну успішність кожного з методів конкурентів. В разі, якщо за якимось показником у двох або більше методів однакові значення, така задача зараховується обом.

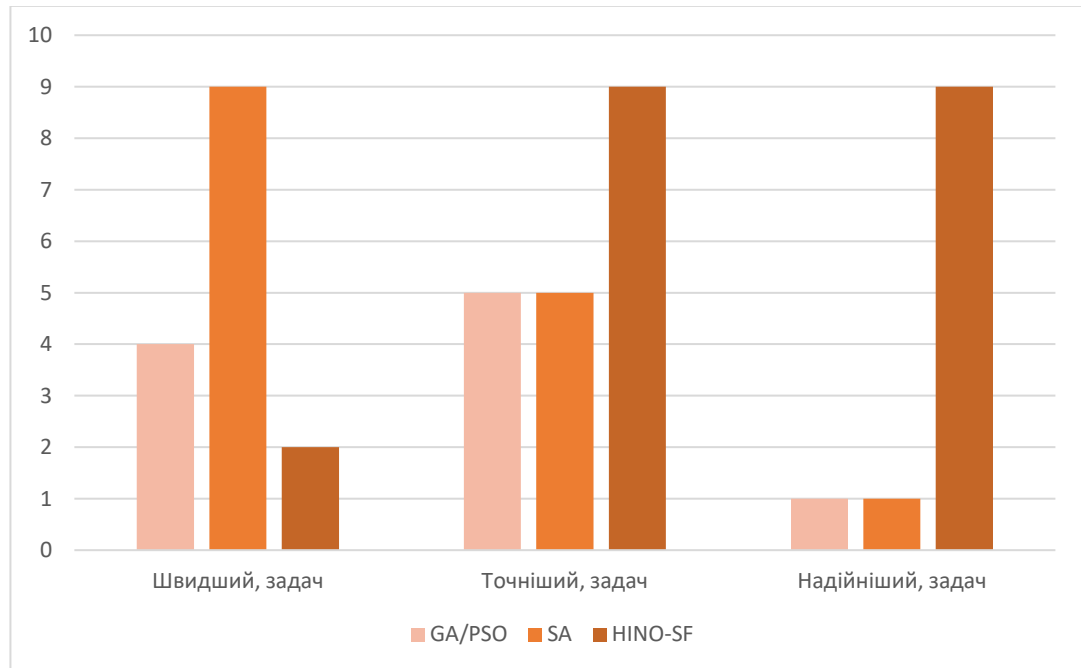


Рис. 6.6. Кількість задач, в яких перемагають алгоритми оптимізації

Як можна побачити з рисунку 7.6, запропонований метод на основі моделювання штучної імунної системи програє іншим еволюційним алгоритмам на більшості задач за критерієм швидкості отримання рішення. Втім, час отримання рішення не є ключовим показником для більшості задач, що вирішуються (крім задач 3 і 4), адже у ОНР є значний ресурс часу на шихтовку, планування плавок чи прогнозування механічних властивостей готової продукції. Тому головними показниками якості є точність та надійність в сенсі повторюваності рішення – у них метод HINO-SF, детально розглянутий у 6 розділі цієї роботи, є кращим для більшості задач.

Підсумовуючи викладене, пропонується надалі в якості методу пошуку рішення в задачах оптимізації ваги зливку з огляду на перебіг технологічного процесу в майбутніх переділах, оптимального розкроювання заготовок прокатного виробництва, оптимізації шихти при конвертерному виробництві та

відновлення функцій математичних моделей сертифікації готової продукції застосовувати гібридний адаптивний метод на основі моделювання штучної імунної системи, що на відміну від відомих використовує оператор клональної селекції на основі методу парних порівнянь Сааті, адаптивний ймовірнісний кросинговер, адаптивні оператори мутації та стиснення популяції та обмежений локальний пошук. Експериментально доведено, що запропонований алгоритм знаходить найкраще рішення з помилкою до 1,7% на широкому колі реальних задач з ймовірністю більше 0,885.

6.4 Експериментальна перевірка моделі оптимального розподілу металу з використанням методу ШС

Наведена в розділі 3 математична модель (3.11) – (3.23) передбачає пошук такої маси металу в ковші і такого її розподілу на зливки на етапі розливки, які б дозволяли на наступних операціях розкроювати передільні заготовки і готову продукцію з останніх, мінімізуючи можливі обрізки і враховуючи поточний розмір замовлення на сортовий прокат.

Математично задача сформульована за наступних припущень:

а) відома кількість блюмів певного перерізу, яку необхідно використати для виготовлення продукції за планом;

б) між виливницями і блюмами встановлена однозначна відповідність, тобто відомо, з якої виливниці метал розкатується у блюм заданого перерізу;

в) кожна передільна заготівка розкроюється на штанги тільки одного розміру, при цьому поділ здійснюється з урахуванням наперед розрахованої методом повного перебору оптимальної довжини передільної заготовки для кожного виду продукції, тобто для кожної довжини передільної штанги.

Оскільки деякі перерізи блюмів передбачають можливість виготовлення з нього не одного виду готового виробу, а відразу кількох, вбачається раціональним максимально використовувати всю довжину отриманого блюма

(всю масу налитого злитка), комбінуючи довжини передільних заготовок в різній кількості.

В постановці (3.11) – (3.23) задача оптимального розливу сталі по виливницях сформульована в межах однієї плавки. Втім розмір замовлення на певну прокатну продукцію з однієї марки сталі може значно перевищувати розмір плавки, відтак перед розв'язанням цієї задачі потрібно здійснити розбиття всього замовлення на частини, кожна з яких може бути виконана за одну плавку.

Слід врахувати, що замовлення на практиці вимірюються не в штангах певної довжини, а в тонах готової продукції. Відтак, реалізація математичної моделі оптимізації розкроювання готової продукції передбачає етап попередньої обробки вихідних даних, на якому:

- 1) з усіх поточних замовлень формується єдине замовлення;
- 2) отримане замовлення, що вимірюється тонами, конвертується в таке, що вимірюється в штангах готової продукції;
- 3) останнє в свою чергу поділяється на декілька частин так, щоб для кожної частини виконувалася умова розв'язності задачі (3.11) – (3.23), а саме (3.14) – маса всіх передільних заготовок з поточної плавки не перевищує маси плавки;
- 4) оцінюється, скільки блюмів і якого перерізу потрібно використовувати для виконання замовлення за (3.15).

Узагальнюючи викладене, ухвалення рішень про використання металу в процесі виконання замовлень на сортовий прокат здійснюється в модулі «Розливка» за алгоритмом:

Крок 1. Завантаження з модулю «Планування» замовлень, що обробляються сьогодні, з БД «Техпроцес» - таблиць відповідності готової продукції та можливих довжин і перетинів передільної заготовки.

Крок 2. Формування єдиного добового замовлення об'єднанням однотипної продукції за типом передільної заготовки (якщо потрібно – маркою сталі). Лічильник плавок $k = 1$.

Крок 3. Допоки $k \leq N_d$ (планової добової кількості плавок):

Крок 3.1. Отримати з модуля «Розкислення» кількість сталі в ковші.

Крок 3.2. Відібрати із загального замовлення частину, яка буде розлита з поточної плавки.

Крок 3.3. Розрахувати для кожного виду готової продукції, що виготовляється з поточної плавки, потребу в передільних заготовках.

Крок 3.4. Розрахувати кількість для кожного виду готової продукції, що виготовляється з поточної плавки, кількість блюмів і їх вагу.

Крок 3.5. Розв'язати задачу оптимізації розливки металу по виливницях у відповідності до (3.11) – (3.23).

Крок 3.6. Видати рекомендацію щодо розливки поточної плавки. $k = k + 1$.

Крок 3.7. Передати дані про розливку і передбачені розкроювання заготовок в модуль «Розкроювання».

Крок 4. Завершити роботу модуля.

План добового замовлення, отриманий за принципами, викладеними в 3 розділі, модуль «Розливка» отримує від модуля «Планування» у вигляді, що ілюструє таблиця 6.6.

Таблиця 6.6 – Приклад добового плану виконання замовлень

| № замовлення | Марка сталі | Вид продукції | Довжина (м) | Маса (т) |
|--------------|-------------|---------------|-------------|----------|
| 20120711 | Ст5ПС | Швелер №8П | 9 | 50 |
| | | Швелер №10П | 9 | 45 |
| | | Швелер №12П | 9 | 75 |
| 20120701 | Ст5ПС | Швелер №10П | 11,7 | 47 |
| | | Швелер №14П | 11,7 | 95 |
| | | Швелер №16П | 11,7 | 90 |
| 20120705 | Ст5ПС | Швелер №8П | 12 | 30 |
| | | Швелер №10П | 12 | 47 |
| | | Швелер №12П | 12 | 69 |
| | | Швелер №14П | 11,7 | 75 |
| 20120724 | Ст5ПС | Швелер №10П | 6 | 114 |
| | | Швелер №12П | 6 | 100 |
| | | Швелер №16П | 6 | 240 |
| | | Швелер №16П | 11,7 | 135 |
| 20120802 | Ст5ПС | Швелер №12П | 6 | 50 |
| | | Швелер №14П | 6 | 81 |
| | | Швелер №8П | 9 | 44 |
| | | Швелер №14П | 11,7 | 150 |

В ній наведений план на один з робочих днів, що передбачає роботу в дві зміни з плановим навантаженням 26 плавок на добу. Сукупне замовлення в таблиці 6.6 дорівнює 1536 тон, що менше розрахункового добового (1560 т) для даного цеху. Оскільки для модуля «Планування» одним з ключових показників оптимальності виконання всього обсягу замовлень є мінімум переналаштувань, на дату, що розглядається, припадає виключно продукція з однієї марки сталі та одного виду прокатної продукції – швелерів.

З таблиці 6.6 легко побачити, що замовлення на певний вид продукції та на певну її довжину майже ніколи не буває кратним стандартному розміру плавки (в даному прикладі 60 тон). Відтак виникає необхідність перегрупування замовлень за типом продукції та розкроюванням (впливає на тип передільної заготовки). Приклад вигляду єдиного добового замовлення представлений в таблиці 6.7.

Оскільки технологічний процес передбачає обмежену кількість металу, що використовується в межах однієї плавки (від 55 до 60 тон), то велике замовлення цілеспрямованим перебором розбивається на частини так, щоб маса кожної з них не виходила за вказані межі. Алгоритм розбиття розроблений таким чином, щоб на одну плавку приходилося якомога менше типів продукції.

Таблиця 6.7 – Загальне добове замовлення

| Вид продукції | Довжина, м | Маса (т) |
|---------------|------------|---------------------|
| Швелер №8П | 9 | 44 + 50 = 90 |
| Швелер №8П | 12 | 30 |
| Швелер №10П | 6 | 114 |
| Швелер №10П | 9 | 45 |
| Швелер №10П | 12 | 47 |
| Швелер №10П | 11,7 | 47 |
| Швелер №12П | 6 | 100 + 50 = 150 |
| Швелер №12П | 9 | 75 |
| Швелер №12П | 12 | 69 |
| Швелер №14П | 6 | 81 |
| Швелер №14П | 11,7 | 75 + 150 + 95 = 320 |
| Швелер №16П | 6 | 240 |
| Швелер №16П | 11,7 | 135 + 90 = 225 |

Зокрема, замовлення з табл. 6.7 поділено на добову планову кількість плавок, інформація про які наведена в табл. 6.8. Слід зазначити, що на практиці частина добового замовлення може бути не включена до жодної з плавок. Тоді вона додається до замовлення наступного дня.

Таблиця 6.8 – Приклад розподілу замовлення на плавки в межах доби

| № плавки | Маса плавки, т | Тип продукції | Довжина продукції, м | Кількість штанг | Кількість передільних заготовок | Маса готового, т | Злиwkів | Вага зливка, т | Передільних в зливку |
|----------|----------------|---------------|----------------------|-----------------|---------------------------------|------------------|---------|----------------|----------------------|
| 1 | 58.31 | 8 | 9 | 880 | 176 | 58.31 | 8 | 7.29 | 22 |
| 2 | 56.19 | 8 | 9 | 500 | 100 | 33.13 | 5 | 6.63 | 20 |
| | | 8 | 12 | 264 | 66 | 23.06 | 3 | 7.69 | 22 |
| 3 | 57.71 | 8 | 12 | 88 | 22 | 7.69 | 1 | 7.69 | 22 |
| | | 10 | 6 | 931 | 133 | 50.03 | 7 | 7.15 | 19 |
| 4 | 57.17 | 10 | 6 | 1064 | 152 | 57.17 | 8 | 7.15 | 19 |
| 5 | 56.91 | 10 | 9 | 100 | 20 | 7.52 | 1 | 7.52 | 20 |
| | | 10 | 11.7 | 476 | 119 | 49.39 | 7 | 7.06 | 17 |
| 6 | 56.46 | 10 | 12 | 462 | 154 | 48.94 | 7 | 6.99 | 22 |
| | | 10 | 9 | 100 | 20 | 7.52 | 1 | 7.52 | 20 |
| 7 | 58.74 | 10 | 9 | 400 | 80 | 30.09 | 4 | 7.52 | 20 |
| | | 12 | 9 | 300 | 60 | 28.65 | 4 | 7.16 | 15 |
| 8 | 58.18 | 12 | 9 | 400 | 80 | 38.20 | 5 | 7.64 | 16 |
| | | 12 | 6 | 312 | 39 | 19.98 | 3 | 6.66 | 13 |
| 9 | 57.37 | 12 | 6 | 896 | 112 | 57.37 | 8 | 7.17 | 14 |
| 10 | 57.37 | 12 | 6 | 896 | 112 | 57.37 | 8 | 7.17 | 14 |
| 11 | 58.40 | 12 | 12 | 336 | 84 | 43.03 | 6 | 7.17 | 14 |
| | | 12 | 6 | 240 | 30 | 15.37 | 2 | 7.68 | 15 |
| 12 | 58.35 | 12 | 12 | 224 | 56 | 28.69 | 4 | 7.17 | 14 |
| | | 14 | 6 | 392 | 56 | 29.66 | 4 | 7.41 | 14 |
| 13 | 57.17 | 14 | 6 | 686 | 98 | 51.90 | 7 | 7.41 | 14 |
| | | 10 | 6 | 98 | 14 | 5.27 | 1 | 5.27 | 14 |
| 14 | 55.98 | 16 | 6 | 728 | 104 | 55.98 | 8 | 7.00 | 13 |
| 15 | 55.98 | 16 | 6 | 728 | 104 | 55.98 | 8 | 7.00 | 13 |
| 16 | 55.98 | 16 | 6 | 728 | 104 | 55.98 | 8 | 7.00 | 13 |
| 17 | 55.98 | 16 | 6 | 728 | 104 | 55.98 | 8 | 7.00 | 13 |
| 18 | 56.68 | 14 | 11.7 | 384 | 128 | 56.68 | 8 | 7.08 | 16 |
| 19 | 56.68 | 14 | 11.7 | 384 | 128 | 56.68 | 8 | 7.08 | 16 |
| 20 | 56.68 | 14 | 11.7 | 384 | 128 | 56.68 | 8 | 7.08 | 16 |
| 21 | 56.68 | 14 | 11.7 | 384 | 128 | 56.68 | 8 | 7.08 | 16 |
| 22 | 56.68 | 14 | 11.7 | 384 | 128 | 56.68 | 8 | 7.08 | 16 |
| 23 | 57.62 | 14 | 11.7 | 255 | 85 | 37.64 | 5 | 7.53 | 17 |
| | | 16 | 11.7 | 117 | 39 | 19.98 | 3 | 6.66 | 13 |
| 24 | 57.37 | 16 | 11.7 | 336 | 112 | 57.37 | 8 | 7.17 | 14 |
| 25 | 57.37 | 16 | 11.7 | 336 | 112 | 57.37 | 8 | 7.17 | 14 |
| 26 | 57.37 | 16 | 11.7 | 336 | 112 | 57.37 | 8 | 7.17 | 14 |
| 27 | 56.01 | 16 | 11.7 | 195 | 65 | 33.30 | 5 | 6.66 | 13 |
| | | 16 | 6 | 196 | 28 | 15.07 | 2 | 7.54 | 14 |
| | | 12 | 9 | 80 | 16 | 7.64 | 1 | 7.64 | 16 |

Підсумок виконання добового замовлення, описаного в таблиці 6.6 при виконанні плавок за планом, наведеним у таблиці 6.8, можна побачити у таблиці 6.9.

Таблиця 6.9 – виконання замовлення з прикладу в табл. 6.7

| Профіль | Довжина, м | Замовлення, т | Виконання, т | Надлишок, т | Виконання замовлення, % |
|-------------|------------|---------------|--------------|-------------|-------------------------|
| Швелер №8П | 9 | 90 | 91.44 | 1.44 | 101.6% |
| Швелер №8П | 12 | 30 | 30.74 | 0.74 | 102.5% |
| Швелер №10П | 6 | 110 | 114.72 | 4.72 | 104.3% |
| Швелер №10П | 9 | 45 | 45.14 | 0.14 | 100.3% |
| Швелер №10П | 12 | 47 | 48.94 | 1.94 | 104.1% |
| Швелер №10П | 11.7 | 47 | 49.39 | 2.39 | 105.1% |
| Швелер №12П | 6 | 150 | 150.09 | 0.09 | 100.1% |
| Швелер №12П | 9 | 74 | 74.50 | 0.50 | 100.7% |
| Швелер №12П | 12 | 70 | 71.72 | 1.72 | 102.5% |
| Швелер №14П | 6 | 81 | 81.56 | 0.56 | 100.7% |
| Швелер №14П | 11.7 | 320 | 321.04 | 1.04 | 100.3% |
| Швелер №16П | 6 | 240 | 244.28 | 4.28 | 101.8% |
| Швелер №16П | 11.7 | 225 | 225.40 | 0.40 | 100.2% |

Як можна побачити з таблиці 6.9, запропонована модель розподілу металу по виливницях, в складі інтегрованої СППР в процесах керування прокатним виробництвом, дозволяє:

- використовувати меншу кількість металу на виконання добового замовлення за рахунок керування висотою розливу зливків, збільшивши кількість плавок із запланованих 26 до 27;
- виконувати добове замовлення на готову продукцію шести видів при чотирьох можливих розкроюваннях з середнім перевищенням 1,8%.

Додаткові дослідження показали, що чим більшими будуть замовлення на однотипну продукцію, тим відчутнішим буде ефект економії металу на виконання поточного замовлення. Це дозволяє виконувати замовлення на прокатну продукцію точно, не створюючи виробничих запасів і незавершеного виробництва.

6.5 Дослідження підсистеми оптимізації процесу розкислення сталі

Запропонований в розділі 5.4 підхід до самонавчання рекомендаційної підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі був реалізований на одному з підприємств Дніпропетровщини. В якості тестової вибірки були обрані 196 послідовних плавок, виконаних на двох конвертерах протягом шести змін в вересні 2021 року. В ході експериментальної перевірки виплавлялася сталь марок 3пс (84 плавки), 5сп (62 плавки) та ст45 (40 плавок).

В таблиці 6.10 наведені вимоги до хімічного складу марок сталі, що розглядалися в експерименті. Виходячи з них формувалися цільові значення, що приймалися за бажані в складі вектору X^* у формулі (5.1). В якості бажаних значень вектору економічних показників плавки приймалися мінімальні спостережені показники серед множини ν відібраних для порівняння «найближчих» за початковими даними протоколів. Значення ν становило від 4 до 7 сценаріїв-прикладів, при цьому більші значення зустрічаються у випадках повторюваних за (5.1) та (5.3) плавок.

Таблиця 6.10. Вимоги до хімічного складу марок сталі, розглянутих в експерименті

| Марка сталі | Хімічний склад за ДСТУ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|------------------------|------|-----|-------|-----|------|------|------|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|-----|------|
| | C | | S | | P | | Si | | Mn | | Ni | | Cr | | Cu | | As | | N | |
| | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max |
| Ст3пс | 0,14 | 0,22 | 0 | 0,05 | 0 | 0,04 | 0,05 | 0,15 | 0,4 | 0,65 | 0 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ст5сп | 0,28 | 0,37 | 0 | 0,05 | 0 | 0,04 | 0,15 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 0 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0 | 0,3 | 0 | 0,08 | 0 | 0,01 |
| Ст45 | 0,42 | 0,5 | 0 | 0,035 | 0 | 0,03 | 0,17 | 0,37 | 0,5 | 0,8 | 0 | 0,3 | 0 | 0,25 | 0 | 0,3 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Для порівняння результатів застосування розробленої підсистеми оператора конвертерного цеха з попереднім режимом роботи було обрано для порівняння по 100 випадкових плавок для кожної з марок сталі, проведених без використання рекомендаційної системи. Результати оцінювались за складовими додаткових витрат у натуральному та грошовому еквіваленті. Порівняння

результатів ілюструє таблиця 6.10, де дані експерименту позначені як «з СППР», а дані щодо ведення аналогічних плавок у минулому – як «без СППР».

Таблиця 6.11 – Порівняння результатів застосування розробленої підсистеми з веденням плавок без порад оператора.

| Показник | Ст3пс | | Ст5сп | | Ст45 | |
|--|----------|--------|----------|--------|----------|--------|
| | Без СППР | З СППР | Без СППР | З СППР | Без СППР | З СППР |
| Кількість плавок | 100 | 84 | 100 | 62 | 100 | 40 |
| Середній час плавки, сек | 1321 | 1081 | 1299 | 1055 | 1381 | 1060 |
| Кількість додувок, % | 14 | 5,95 | 19 | 6,45 | 21 | 7,5 |
| Середня витрата охолоджувачів на плавку, тон | 6,55 | 6,98 | 6,69 | 5,11 | 6,31 | 6,01 |
| Середня витрата кисню на плавку, тис. м ³ | 210,44 | 202,20 | 199,27 | 191,84 | 219,99 | 208,86 |
| Плавок з перевищенням температури, % | 22 | 5,95 | 27 | 4,84 | 23 | 2,5 |
| Плавок з порушенням основності, % | 6 | 3,57 | 4 | 1,62 | 3 | 2,5 |
| Порушення хімічного складу готової сталі | 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Отримані в результаті експериментів результати свідчать про те, що використання підсистеми оператора конвертера, що навчається на найбільш близьких прикладах з бази даних попередніх плавок дозволяє уникнути випадків отримання сталі, яка не відповідає заданій марці за хімічним складом; зменшити відсоток плавок з порушенням основності в середньому на 42%, плавок з перевищенням температури – на 79%; зменшити середні витрати охолоджувача на плавку на 6%, а середню витрату кисню на плавку – на 4%; зменшити кількість додувок в 2,88 рази, а середній час плавки – на 19%.

Викладений в розділі 5.2 алгоритм самонавчання підсистеми оптимізації процесу розкислення сталі входить до загальної СППР керування багатоетапним прокатним виробництвом. Метою даної підсистеми є мінімізація собівартості використаних феросплавів, що використовуються в ході розкислення сталі, що після продувки містить значну кількість розчиненого кисню.

Перед впровадженням даної підсистеми у виробництво була проведена експериментальна перевірка якості навчання, а саме добування знань, які

використовує підсистема в роботі. Перевірка методів добування знань в складі СППР була виконана з використанням даних плавки ПАТ «Дніпровський металургійний завод» (загалом 12 039 плавки). При цьому результати роботи навченої системи порівнювалися з альтернативним підходом, традиційним для подібних систем – використанням дерева рішень [244]. В ході порівняння методів навчання для дерева рішень використовувалась така ж кількість термів опису вхідних та вихідних параметрів, як і для наївної мережі Байєса.

Оцінка точності продукційних моделей, що використовують запропонований та альтернативний методи добування знань за середньоквадратичною похибкою апроксимації наведена у таблиці 6.12.

Таблиця 6.12. Середньоквадратична похибка апроксимації

| Вибірка | Розкислювач | Байєсівська мережа | | Дерево рішень | |
|-----------|---------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | | Абсолютна помилка, кг | Відносна помилка, в.о. | Абсолютна помилка, кг | Відносна помилка, в.о. |
| Навчальна | FeMn | 37,40 | 0,0926 | 45,089 | 0,1116 |
| | SiMn | 40,59 | 0,0551 | 47,138 | 0,0640 |
| | FeSi | 2,83 | 0,0195 | 2,849 | 0,0196 |
| | В середньому | | 0,0557 | | 0,0650 |
| Тестова | FeMn | 36,86 | 0,0844 | 71,026 | 0,1625 |
| | SiMn | 44,16 | 0,0601 | 58,139 | 0,0791 |
| | FeSi | 4,54 | 0,0325 | 4,1411 | 0,0296 |
| | В середньому | | 0,0590 | | 0,0904 |

З результатів порівняння можна побачити, що база знань, побудована на основі наївних байєсівських мереж, дає точніші результати апроксимації як на навчальній виборці, так і на тестовій. Помилка прогнозування не перевищує 10%, що близько до інструментальної помилки системи автоматичного регулювання подачі феросплавів.

Слід врахувати, що кількість правил у базі знань, сформованій за запропонованим підходом значно більша ніж за альтернативним: якщо для байєсівської мережі їх сформовано 1598, то для дерева рішень – лише 422. Традиційно вважається [245], що якомога менша кількість правил є бажаною для інтелектуальної СППР, оскільки підвищує її швидкодню і необхідний ресурс

використання пам'яті. Втім, проведені повторні експерименти (200 повторювань з різними вхідними даними на вже навчених підсистемах) показали, що швидкість обробки вхідної інформації з використанням отриманих баз знань та розрахунку кінцевого результату в обох системах вкладається у межі реального масштабу часу ведення даного технологічного процесу, а саме не перевищує 1 хвилини при використанні існуючого апаратного забезпечення.

Застосування сформованих баз знань на практиці показало, що прогнозовані таким чином маси необхідних на плавку феросплавів перевищують величини, розраховані теоретично. Тобто, на практиці оператор конвертерного виробництва, свідомо чи ні, але частіше за все використовує надлишок феросплавів, що негативно впливає на собівартість сталі.

Відтак було проведене додаткове дослідження чутливості похибки апроксимації розроблених ІС ППР до зміщення центрального значення термів вихідних змінних з метою визначення меж економії феросплавів. При цьому, контролювалися як прогнозовані параметри сталі, так і керовані змінні (витрата феросплавів), а також похибка прогнозування. Результати додаткового експерименту ілюструє таблиця 6.13, де величина зміщення вказана у відсотках, та варіюється від 1% до 3%.

Також у таблиці вказано питомі витрати кожного окремого феросплаву та загальну кількість розкислювачів. Дані дослідження проводили на тестовій виборці, що нараховує 4013 плавок сталі марки 5пс. Фактичні витрати феросплавів та обсяг отриманої сталі на цих плавках складають:

- питомі витрати FeMn – 1,927 кг/т;
- питомі витрати SiMn – 5,6 кг/т;
- питомі витрати FeSi – 0,007 кг/т;
- загальні витрати – 7,427 кг/т;
- прийнято сталі – 239 556,57 т.

Таблиця 6.13. Залежність похибки апроксимації та витрат феросплавів від зміщення центру термів в підсистемі оптимізації процесу розкислення

| Зміщення центр. знач. терму, % | Витрати, кг/т | | | | Похибка, % | | |
|--------------------------------|---------------|-------|-------|---------|------------|-------|-------|
| | FeMn | SiMn | FeSi | Загалом | FeMn | SiMn | FeSi |
| 0 | 1,879 | 5,584 | 0,006 | 7,469 | 8,533 | 5,723 | 3,126 |
| 1 | 1,875 | 5,566 | 0,006 | 7,447 | 8,537 | 5,722 | 3,123 |
| 2 | 1,871 | 5,549 | 0,006 | 7,425 | 8,542 | 5,727 | 3,120 |
| 3 | 1,867 | 5,531 | 0,006 | 7,403 | 8,547 | 5,739 | 3,116 |
| 5 | 1,858 | 5,495 | 0,006 | 7,359 | 8,558 | 5,780 | 3,110 |
| 7 | 1,850 | 5,459 | 0,006 | 7,315 | 8,571 | 5,845 | 3,104 |
| 10 | 1,838 | 5,406 | 0,006 | 7,249 | 8,594 | 5,986 | 3,094 |
| 12 | 1,829 | 5,370 | 0,006 | 7,205 | 8,611 | 6,108 | 3,088 |
| 15 | 1,817 | 5,317 | 0,006 | 7,139 | 8,640 | 6,328 | 3,079 |
| 17 | 1,808 | 5,281 | 0,005 | 7,095 | 8,661 | 6,498 | 3,073 |
| 20 | 1,796 | 5,227 | 0,005 | 7,029 | 8,695 | 6,725 | 3,064 |
| 25 | 1,775 | 5,138 | 0,005 | 6,919 | 8,760 | 7,335 | 3,050 |
| 30 | 1,754 | 5,049 | 0,005 | 6,808 | 8,834 | 7,960 | 3,036 |

Як видно із даних в таблиці, питомі витрати феросплавів при використанні у якості центрального значення терму його математичного очікування дають результати гірші, ніж фактичні, тобто витрати розкислювачів, що розраховані програмно, перевищують ті значення, необхідні для отримання заданої марки сталі згідно із завданням. Це в свою чергу означає, що навчена на поведінці операторів конвертерного цеху за методикою, викладеною в розділі 5.2, підсистема оптимізації розкислення, не забезпечує економічну оптимальність цієї частини технологічного процесу. Відтак було прийняте рішення центральне значення терму зміщати у менший бік в порівнянні з навчальним. Таким чином вдалось досягти очікуваних результатів – витрати феросплавів знизились у порівнянні із фактичними.

Зменшення питомих витрат розкислювачів при використанні байесівської мережі призводить до наступних змін похибки апроксимації:

- незначне збільшення для FeMn;

- істотне збільшення для SiMn;
- незначне зменшення для FeSi.

Таким чином, при зміщенні центру термів наївної мережі Байєса на 10% досягається компромісний оптимум: при загальній економії феросплавів 0,398 кг/т похибка апроксимації СППР збільшується не більше ніж на 1%.

Водночас, при використанні дерева рішень зміщення термів навіть у незначних межах викликає значні зміни в структурі самого дерева, зміни сотень правил. При зміщенні деяких термів униз на величину до 10% можна досягти економії феросплавів в середньому 0,118 кг/т.

6.6. Експериментальна перевірка моделі та методу прогнозування ресурсу футеровки конвертера

В розділі 3.3 запропонована двоетапна модель класифікації поточного стану футеровки конвертера спочатку за категорійними параметрами, а потім за числовими, з наступним застосуванням регресійних моделей для прогнозування стійкості футеровки. Моделювання циклів роботи попередніх футеровок в просторі двох перших головних компонент показало, що ключову роль для ідентифікації класу експлуатації поточної футеровки грає перша головна компонента, до якої з високими ваговими коефіцієнтами входять фактори:

- кількість шлакувань (фактор X18);
- виробник футеровки (X24);
- кількість торкретувань (X16);
- середній вміст заліза в шлаку (X13);
- відсоток плавки з перевищенням температури (X11);
- кількість додувок (X1);
- кількість сірки в чавуні (X4).

Віднесена до того чи іншого кластеру, поточна футеровка оцінюється на предмет резерву роботи за обґрунтованими в розділі 3 формулами.

Викладений метод, пізніше включений в якості модуля «Футеровка» до складу СППР керування прокатним виробництвом, був експериментально перевірений на 100 прикладах на 11 футеровках, що були встановлені на двох конвертерах ПАТ «ДМЗ» і відпрацювали за цей час 23046 плавок за 653 дні.

Для кожної плавки робився попередній прогноз витривалості за апіорними факторами (виробник, пора року експлуатації та планове навантаження), після чого відбувався періодичний контроль стану з прогнозуванням витривалості та рекомендаціями щодо максимізації її витривалості.

Оскільки викладена в розділі 3.3 математична модель прогнозування витривалості футеровки передбачає оцінку лише числа плавок, що залишилися при веденні технологічного процесу таким самим чином, як відбувався в середньому з моменту встановлення поточної футеровки, додатково здійснювався «оптимістичний» прогноз: скільки зможе працювати поточна футеровка за умови «ідеального» для неї технологічного процесу. В якості «ідеального» процесу приймалися значення параметрів моделі прогнозування, що приводили до екстремуму прогнозу функцію для даного класу. Як було показано на рис. 5.5, оператору пропонувалося за можливості змінити параметри ведення плавок за рахунок:

- збільшення кількості шлакувань (фактор X18);
- збільшення кількості торкретувань (фактор X16);
- зменшення середнього вмісту заліза в шлаку (фактор X13) або
- зменшити кількість плавок з низькою основністю шлаку (фактор X6);
- зменшити кількість плавок з перевищенням температури (фактор X11);
- зменшити кількість додувок (фактор X1);
- зменшити кількість сірки в чавуні (X4).

Згадані фактори можна змінювати як вибірково, так і одночасно, тим пак, що в більшості вони пов'язані (вміст заліза в шлаку зменшує його основність, а кількість сірки збільшує температуру плавки і т.д.).

В результаті експериментів бути отримані результати, які ілюструються даними в таблицях 6.14 та 6.15, де наведено відомості відповідно про експлуатацію футеровки китайського виробництва «Інгкоу (загалом 3001 плавка) та про експлуатацію футеровки австрійського виробництва RHI AG (загалом 1828 плавок).

Таблиця 6.14. Експериментальна перевірка стійкості футеровки «Інгкоу»

| Номер контрольної точки | Проведено плавок | Прогноз стійкості футеровки | Прогноз з породами | Фактично плавок | Час експлуатації, % | Розрив у прогнозах, % | Відхилення прогнозу з породами від фактичного |
|-------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|---|
| 1 | 0 | 2915 | 2915 | 3001 | 0,00% | 0,00% | -2,87% |
| 2 | 150 | 1814 | 2816 | 3001 | 5,00% | 74,47% | -6,16% |
| 3 | 303 | 3021 | 3440 | 3001 | 10,10% | 13,87% | 14,63% |
| 4 | 445 | 2497 | 2989 | 3001 | 14,83% | 19,70% | -0,40% |
| 5 | 606 | 2659 | 3087 | 3001 | 20,19% | 16,10% | 2,87% |
| 6 | 755 | 2944 | 3232 | 3001 | 25,16% | 9,78% | 7,70% |
| 7 | 901 | 2491 | 3056 | 3001 | 30,02% | 22,68% | 1,83% |
| 8 | 1049 | 2534 | 3244 | 3001 | 34,96% | 28,02% | 8,10% |
| 9 | 1198 | 2578 | 3221 | 3001 | 39,92% | 24,94% | 7,33% |
| 10 | 1352 | 2488 | 3214 | 3001 | 45,05% | 29,18% | 7,10% |
| 11 | 1449 | 2314 | 3091 | 3001 | 48,28% | 33,58% | 3,00% |
| 12 | 1655 | 2617 | 3137 | 3001 | 55,15% | 21,78% | 4,53% |
| 13 | 1808 | 2523 | 3132 | 3001 | 60,25% | 26,12% | 4,37% |
| 14 | 1960 | 2614 | 3122 | 3001 | 65,31% | 20,58% | 4,03% |
| 15 | 2048 | 2644 | 3125 | 3001 | 68,24% | 18,19% | 4,13% |
| 16 | 2242 | 2687 | 3119 | 3001 | 74,71% | 16,08% | 3,93% |
| 17 | 2397 | 2788 | 3099 | 3001 | 79,87% | 11,15% | 3,27% |
| 18 | 2555 | 2910 | 3081 | 3001 | 85,14% | 5,88% | 2,67% |
| 19 | 2711 | 2964 | 3038 | 3001 | 90,34% | 2,50% | 1,23% |
| 20 | 2847 | 3000 | 3021 | 3001 | 94,87% | 0,70% | 0,67% |

Як можна побачити з таблиць, контроль стану футеровки з прогнозуванням її стану здійснювався періодично, приблизно кожні 150 плавок. Аналізуючи результати в таблицях 6.14 та 6.15, слід зауважити наступне.

Таблиця 6.15. Експериментальна перевірка стійкості футеровки РХІ

| Номер контрольної точки | Проведено плавок | Прогноз стійкості футеровки | Прогноз з порадами | Фактично плавок | Час експлуатації, % | Розрив у прогнозах, % | Відхилення прогнозу з порадами від фактичного |
|-------------------------|------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|---|
| 1 | 0 | 1694 | 1694 | 1828 | 0,00% | 0,00% | -7,33% |
| 2 | 144 | 1513 | 1816 | 1828 | 7,88% | 20,03% | -0,66% |
| 3 | 302 | 1914 | 2074 | 1828 | 16,52% | 8,36% | 13,46% |
| 4 | 451 | 1798 | 2045 | 1828 | 24,67% | 13,74% | 11,87% |
| 5 | 610 | 1659 | 1898 | 1828 | 33,37% | 14,41% | 3,83% |
| 6 | 751 | 1724 | 1955 | 1828 | 41,08% | 13,40% | 6,95% |
| 7 | 909 | 1791 | 1899 | 1828 | 49,73% | 6,03% | 3,88% |
| 8 | 1052 | 1752 | 1875 | 1828 | 57,55% | 7,02% | 2,57% |
| 9 | 1211 | 1795 | 1888 | 1828 | 66,25% | 5,18% | 3,28% |
| 10 | 1354 | 1785 | 1862 | 1828 | 74,07% | 4,31% | 1,86% |
| 11 | 1497 | 1818 | 1854 | 1828 | 81,89% | 1,98% | 1,42% |
| 12 | 1641 | 1821 | 1853 | 1828 | 89,77% | 1,76% | 1,37% |
| 13 | 1812 | 1825 | 1830 | 1828 | 99,12% | 0,27% | 0,11% |

По-перше, з даних в таблицях легко помітити, що прогноз терміну роботи футеровки, зроблений за регресійними моделями, наведеними в розділі 3.3 за поточними умовами її експлуатації завжди менший, ніж «ідеальний» прогноз за умови ведення плавок в найбільш бажаному для футеровки режимі. Як можна побачити з рисунків 6.7 та 6.8, де відображена динаміка прогнозних значень, на початкових етапах контролю ці прогнозні значення можуть сильно коливатися.

Це обумовлено тим, що навіть невелика кількість плавок з параметрами, що значно погіршують або ж значно покращують стан вогнетривів, впливають на загальний прогноз достатньо суттєво, адже параметрами прогнозуючих моделей є фактори, які визначаються як середні або відносні значення по вибірці плавок. Чим вибірка стає довшою, тим вплив окремої плавки стає менш значимим, а графіки «реалістичного» та «ідеального» прогнозу зближуються.

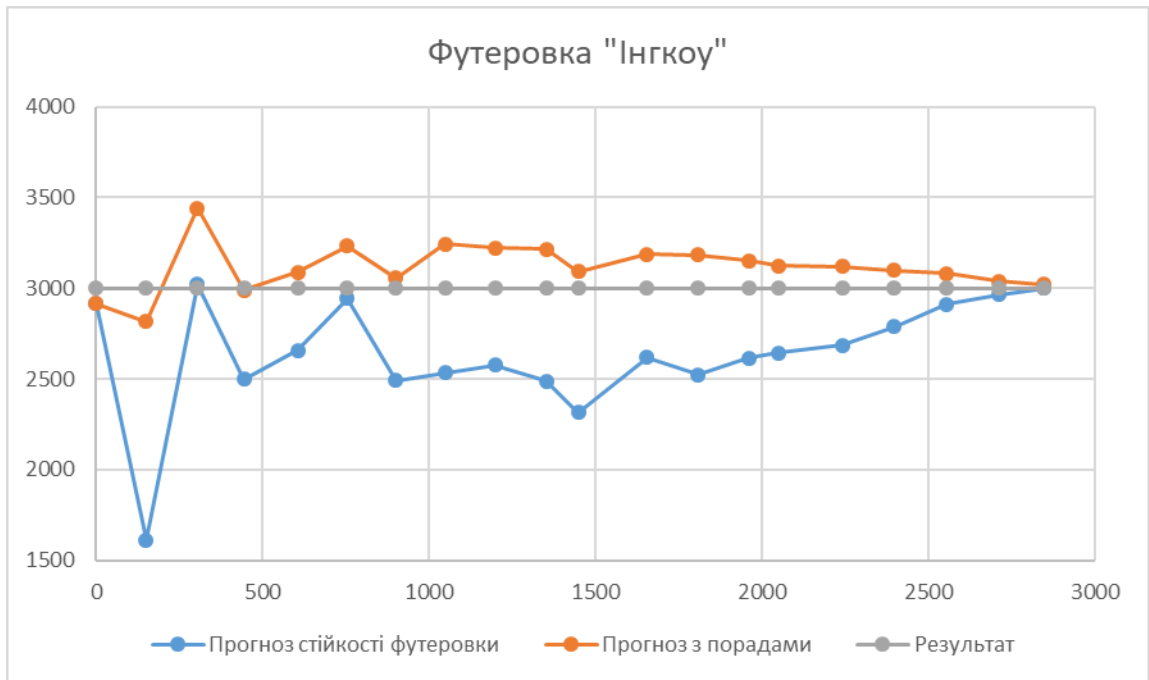


Рис. 6.7. Динаміка прогнозу стійкості футеровки «Інґкоу» та фактичне значення

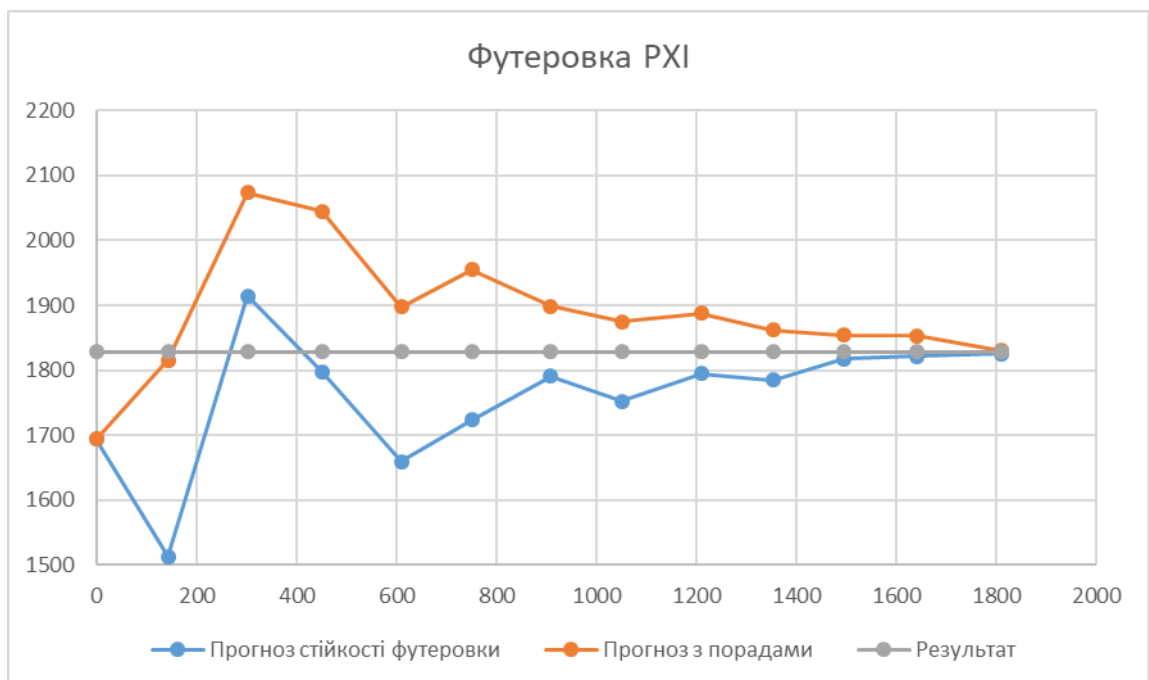


Рис. 6.8. Динаміка прогнозу стійкості футеровки РХІ та фактичне значення

По-друге, слід відзначити психологічний фактор наявності рекомендаційної системи в складі СППР оператора конверторного цеху, яка змушує, особливо на заключних етапах проводити плавки більш обачно з точки зору збереження вогнетривів (застосовуючи азотування, торкретування та

уникаючи перегріву тощо). Про це свідчить підвищення в заключній третині часових графіків прогнозу.

Багато в чому з останнім пов'язаний головний результат, який ілюструється графіками на рисунка 6.7 та 6.8 – в обох випадках футеровка з використанням рекомендаційної підсистеми в складі СППР керування металургійним виробництвом пропрацювала більше за апріорний термін, отриманий як математичне очікування для даного типу футеровки, конвертера, пори року та очікуваного режиму експлуатації. Зведення по всіх 11 плавках, які контролювалися в експериментальному дослідженні, наведені в таблиці 7.9, де T_a – апріорний проноз стійкості футеровки, T_{max} та T_{min} – відповідно максимальне та мінімальне значення прогнозу стійкості, отримані в ході роботи конвертера і контролю стійкості футеровки. ΔT_a , ΔT_{max} та ΔT_{min} – відповідно відхилення фактичного значення стійкості від відповідних прогнозних значень.

Таблиця 6.16. Апріорний, мінімальний та максимальний прогнози стійкості футеровок та їх порівняння з фактичними даними

| № з/п | Виробник | Прогнозне значення стійкості | | | Фактичне значення | Відхилення фактичного від прогнозу, % | | |
|---------------------|----------|------------------------------|-----------|-----------|-------------------|---------------------------------------|------------------|------------------|
| | | T_a | T_{max} | T_{min} | | ΔT_a | ΔT_{max} | ΔT_{min} |
| 1 | Інгкоу | 2840 | 3258 | 1880 | 3011 | 6,02% | -7,58% | 60,16% |
| 2 | Далмонт | 2360 | 3060 | 1711 | 2821 | 19,53% | -7,81% | 64,87% |
| 3 | РХІ | 2031 | 2495 | 1579 | 2149 | 5,81% | -13,87% | 36,10% |
| 4 | Далмонт | 2644 | 2999 | 1972 | 2586 | -2,19% | -13,77% | 31,14% |
| 5 | РХІ | 2090 | 2453 | 1896 | 2155 | 3,11% | -12,15% | 13,66% |
| 6 | Майєртон | 1844 | 1930 | 1544 | 1798 | -2,49% | -6,84% | 16,45% |
| 7 | Майєртон | 1611 | 1889 | 1318 | 1716 | 6,52% | -9,16% | 30,20% |
| 8 | Далмонт | 2324 | 2759 | 1673 | 2144 | -7,75% | -22,29% | 28,15% |
| 9 | Інгкоу | 2915 | 3440 | 1614 | 3001 | 2,95% | -12,76% | 85,94% |
| 10 | Далмонт | 2136 | 2588 | 1701 | 2292 | 7,30% | -11,44% | 34,74% |
| 11 | РХІ | 1694 | 2074 | 1513 | 1828 | 7,91% | -11,86% | 20,82% |
| В середньому | | | | | | 4,25% | -11,78% | 38,38% |

Як можна побачити з таблиці 6.16, в 8 випадках з 11 футеровка пропрацювала довше, ніж апріорний прогноз, отриманий за статистичними даними для даної марки вогнетривів, пори року та прогнозованої інтенсивності експлуатації. В середньому футеровки з рекомендаційною системою працюють

на 4,25% часу довше. При цьому слід звернути увагу, що фактичне значення виявляється ближчим до «оптимістичного» прогнозу, зумовленого оптимальним веденням процесу плавки. Середнє відхилення від максимального прогнозованого значення більше ніж в три рази менше ніж відхилення від «песимістичного» прогнозу, оснований на поточному веденні плавки.

Нарешті, останній результат ілюструє залежність на рисунку 6.9, побудована за даними з таблиць 6.14 та 6.15, яка ілюструє залежність відхилення «оптимістичного» прогнозу рекомендаційної системи, що передбачає оптимальні умови ведення плавки від часу роботи футеровки у відносних одиницях.

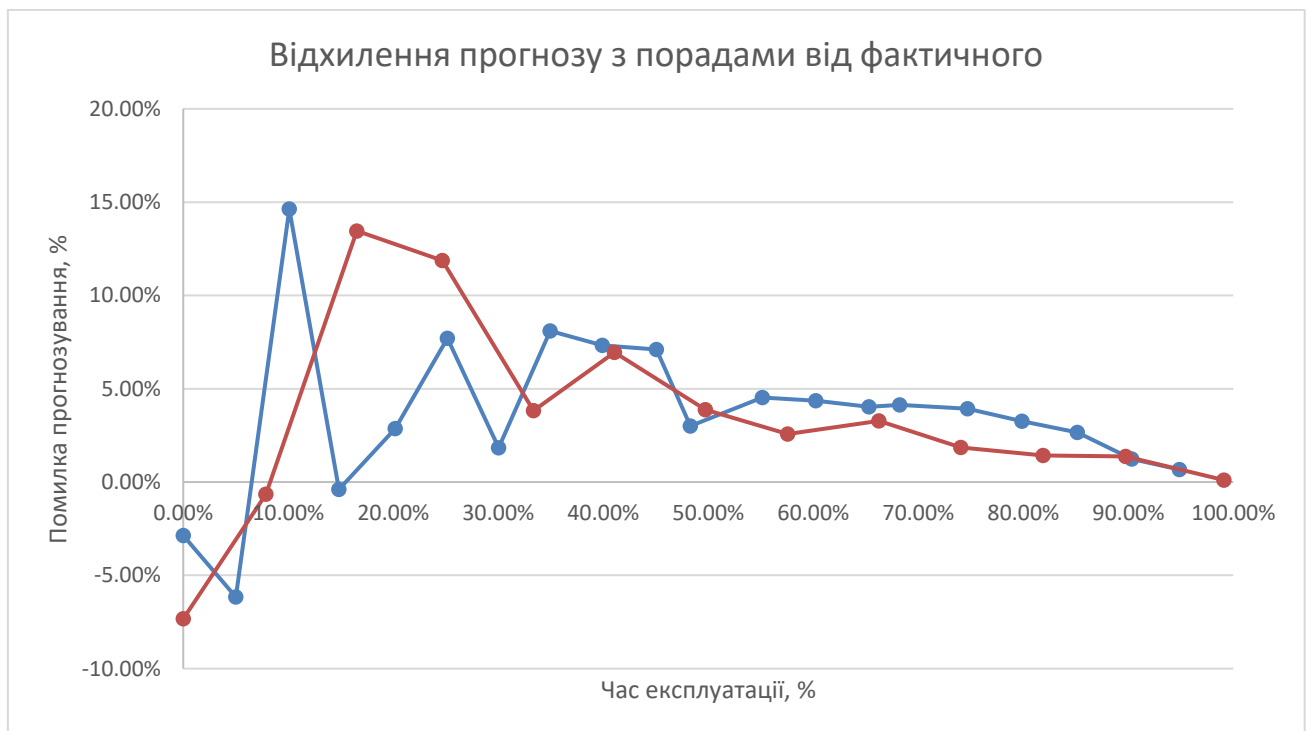


Рис. 6.9. Відносне відхилення прогнозованого значення від фактичного залежно від часу експлуатації футеровки

З рисунку 6.9, на якому показані помилки прогнозування футеровок, експлуатація яких описана в таблицях 6.14 та 6.15, можна зробити корисний практичний висновок: якщо футеровка вже відпрацювала половину свого терміну експлуатації, прогнозне значення її стійкості з врахуванням порад, не

відрізняється більше ніж на 5% від фактичного. Аналогічні залежності було отримано для інших футеровок. Отриманий висновок дозволяє на практиці з точністю 3-5% запланувати час зупинки конвертера на заміну футеровки ще на половині прогнозованого часу експлуатації.

6.7. Висновки до розділу 6

1. Застосування в задачі побудови плану виконання замовлень широкого сортаменту з урахуванням часу переналаштування обладнання запропонованої математичної моделі зі зведеним економічним критерієм оптимізації у викладеній нотації дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, що для фіксованого набору завдань на 4,5% - 9,5% ефективніші, ніж побудовані за традиційними методами. Останнє стало можливим за рахунок зменшення витрат від переналаштування обладнання та розривів часу між виготовленням та відвантаженням замовлень.

2. Запропонований алгоритм, що включає математичну модель оптимізації розподілу маси металу в ковші на зливки, які б дозволяли на наступних операціях розкрюювати передільні заготовки і готову продукцію з останніх, мінімізуючи можливі обрізки і враховуючи поточний розмір замовлення на сортовий прокат, було реалізовано в складі інтегрованої СППР. Як показало моделювання виконання ряду замовлень, використання згаданої моделі дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу за рахунок мінімізації немірної продукції та кількості обрізків на 2,4-2,5% при обробці великих замовлень та на 3-4% при виконанні малих замовлень.

3. Практична перевірка викладеного в розділі 3 підходу до побудови апроксимуючих поліноміальних функцій багатьох змінних, що відрізняється від відомих раніше використанням у поліномах від'ємних степенів та застосуванням до поліномів обмеження на сумарну величину степені добутку змінних, дозволяє у 2-3 рази зменшити кількість невідомих, що ідентифікуються, при цьому

середньоквадратична помилка апроксимації зменшується у 1,5–2,5 рази. В ході досліджень з'ясовано, що величина параметру тиску розмірності, запропонована у якості штрафної функції критерію оптимізації, не має перевищувати $\alpha \leq 0,1$, оскільки при більших значеннях різко зростає помилка апроксимації.

4. Використання запропонованого гібридного адаптивного методу як алгоритму пошуку рішення в задачах оптимізації в складі СППР виробництва прокату показало, що запропонований метод знаходить найкраще рішення з помилкою до 1,7% на широкому колі реальних задач з ймовірністю більше 0,885. Повторюваність кращого рішення у запропонованого алгоритму в 9 з 11 випадків вища ніж у інших еволюційних алгоритмів.

5. Експериментально доведено, що запропонована модель розподілу металу по виливницях, застосована в складі інтегрованої СППР в процесах керування прокатним виробництвом, дозволяє використовувати меншу кількість металу на виконання добового замовлення за рахунок керування висотою розливу зливків, а також виконувати добове замовлення на готову продукцію з середнім перевищенням 1,8%. Додаткові дослідження показали, що зі зростанням розміру замовлення на однотипну продукцію зростає ефект економії металу на виконання поточного замовлення. Це дозволяє виконувати замовлення на прокатну продукцію точно, не створюючи виробничих запасів і незавершеного виробництва.

6. Використання моделі та методу прогнозування стійкості футеровки в складі підсистеми рекомендацій щодо ведення плавки показало, що:

- фактичне значення стійкості футеровки за умови використання рекомендаційної підсистеми в складі СППР керування прокатним виробництвом перевищує апріорний прогноз, отриманий за статистичними даними для даної марки вогнетривів, пори року та прогнозованої інтенсивності експлуатації в середньому на 4,25%;

- наявність системи рекомендацій і відповідного розриву між «реалістичним» прогнозним значенням стійкості та «оптимістичним» за умови оптимальних умов ведення плавки змушує оператора конвертера проводити

плавки і обслуговування футеровки більш акуратно, тим самим збільшуючи термін її експлуатації;

- якщо футеровка вже відпрацювала половину свого терміну експлуатації, прогнозне значення її стійкості з врахуванням порад, не відрізняється більше ніж на 5% від фактичного.

Останнє дозволяє з точністю 3-5% запланувати час зупинки конвертера на заміну футеровки ще на половині прогнозованого часу її експлуатації.

ВИСНОВКИ

Запропонована робота є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна наукова проблема обґрунтування принципів та розробки методів і засобів створення інтегрованих систем інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в задачах прогнозування та керування процесами багатоетапного виробництва сортового прокату шляхом розробки комплексу математичних моделей цих процесів, методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень з використанням узагальнених економічних критеріїв.

Встановлено, що:

1. План виконання замовлень на виготовлення сортового прокату широкого сортаменту синтезується (в рамках вирішення незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці) на основі згортки критеріїв максимізації частки вчасно виконаних замовлень та мінімізації обсягів незавершеного виробництва, часу неробочого стану обладнання та кількості відхилених замовлень, що дозволяє виконувати тижневі та місячні замовлення за мінімальний час.

2. Запропонований гібридний метод оптимізації на базі штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції, забезпечує знаходження глобального оптимуму багатовимірних задач умовної оптимізації з вищою ймовірністю, ніж у відомих еволюційних алгоритмів, що підвищує ефективність розв'язання цих задач в процесах планування та керування у виробництві прокату.

3. Використання в регресійних моделях механічних характеристик сортового прокату від'ємних ступенів предикторів та штрафу на розмірність поліному забезпечує підвищення точності моделі з одночасним зменшенням кількості її параметрів, що дозволяє замінити безпосередні вимірювання статистичними прогнозами та скоротити час і вартість сертифікації готової продукції.

Основні наукові та практичні результати наведеної роботи полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель побудови плану виконання замовлень на виготовлення прокату широкого сортаменту з урахуванням часу переналаштування обладнання, що передбачає одночасне зважене врахування критеріїв, як незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці. Застосування такої моделі дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, ефективніші, ніж отримані за традиційною методикою.

2. Розроблено математичну модель мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення певного замовлення, що спирається на наперед відомий оптимальний розмір передільної заготовки та вимоги до розкроювання готової продукції. Застосування розробленої моделі в багатоетапному металургійному виробництві дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу та загальний обсяг обрізків.

3. Розроблено гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції та обґрунтовані методи адаптації згаданих операторів. Його застосування для задач планування та керування в багатоетапних металургійних виробництвах дозволяє підвищити надійність та точність отриманих розв'язків.

4. Розроблено метод відновлення математичних залежностей прогнозуючих моделей металургійних виробництв від хімічних та фізичних параметрів отримання сталі за рахунок використання в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосування штрафу на розмірність апроксимаційного поліному. Це дозволило підвищити відповідність моделей сутності фізичних процесів, та отримати прогностичні моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації.

5. Набув подальшого розвитку метод прогнозування стійкості футеровки сталеплавильного агрегату за технічними параметрами та статистичними показниками ведення плавки з двоетапною класифікацією поточного процесу на

основі навчання. Його застосування дозволило будувати прогнозуючі моделі стійкості футеровки та надавати оператору поради щодо збільшення ресурсу в режимі реального часу.

6. Сформульовано принцип роботи системи підтримки прийняття рішень багатоетапного виробництва сортового прокату при вирішенні задач планування та керування, оснований на паралельній обробці замовлення на різних етапах. Це дозволило підвищити загальну ефективність виробництва за рахунок зменшення витратного коефіцієнту металу, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

7. Отримали подальший розвиток методи навчання рекомендаційних підсистеми оператора конвертерного виробництва, основані на аналізі попередньої діяльності, що використовують шаблони вдалого попереднього досвіду з корекцією на поведінку людини. Застосування цих методів в процесах рафінації та розкислення сталі дозволило суттєво зменшити вплив «людського фактору» на ведення плавки та скоротити використання феросплавів.

8. Удосконалено математичну модель задачі оптимізації конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм з урахуванням матеріально-теплового балансу як багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями. Застосування отриманої моделі дозволяє підтримувати собівартість сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Українська металургія: сучасні виклики та перспективи розвитку [Архівовано 17 травня 2014 у [Wayback Machine](#).] / О. І. Амоша, В. І. Большаков, Ю. С. Залознова, Л. О. Збаразська, Ю. В. Макогон та ін. // НАН України, Інститут економіки промисловості. — Донецьк, 2013. https://web.archive.org/web/20140517161925/http://iep.donetsk.ua/akadem_sl/sluhan_ua_po_met/akadem_sluh_met.pdf
2. Steel Statistical Yearbook. <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>. Архів [оригіналу](#) за 28 січня 2021.
3. Україна піднялась на 12 місце світових виробників сталі. <http://uprom.info/>. Національний промисловий портал. 29 липня 2018. Архів [оригіналу](#) за 29 липня 2018. Процитовано 29 липня 2018.
4. Бучинський М.Я., Горик О.В., Чернявський А.М., Яхін С.В. Основи творення машин / [За ред. О.В. Горика]. – Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. — 448 с. : 52 іл. ISBN 978-966-2989-39-7
5. Виробництво сталевих безшовних труб на трубопрокатній установці «ТПА-200» у трубному цеху №4: Технологічна інструкція ТИ 243-ТРЗ-01-2002 [Текст] : під ред. Ю.Д. Угрюмова. – Дніпропетровськ: ВАТ «Інтерпайп-НТЗ». – 2012. – 224 с.
6. Технологічна інструкція з виготовлення блюмів, заготівки та фасонних профілів у прокатному цеху №1: під ред. Каніщева Л.І. – Дніпропетровськ: ДМЗ ім. Петровського. – 2014. – 340 с.
7. Scherbina, T.V. (2014) Automated Information System for Metallurgical Plants. – Metallurgist v. 58, 346–352. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9914-2>
8. Амоша О.І., Нікіфорова В.А. Розвиток металургійної смарт-промисловості в Україні: передумови, проблеми, особливості, наслідки: науково-аналітична доповідь; НАН України, Ін-т економіки пром-сті. Київ, 2019. 67 с.

9. Vallerio, M.; Hufkens, J.; Van Impe, J. & Logist, F. An interactive decision-support system for multi-objective optimization of nonlinear dynamic processes with uncertainty, *Expert Systems with Applications*, Volume 42, Issue 21, 2015, Pages 7710-7731, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.05.038>

10. Желдак Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають мірність сортового прокату та шляхи мінімізації немірної продукції / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Науковий вісник НГУ, №8. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – с. 73-77.

11. Словник металургійних термінів: У 2 т.: Українсько-грузинсько-російсько-англійсько-німецько-французький / Гол. наук. ред. Б.Є. Патон ; гол. ред. Г.В. Кашакашвілі ; НАН України, РАН, НАН Грузії, РАПН, Грузинський технічний ун-т. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM) – К. : Фенікс, 2014.

12. Російсько-український коксохімічний словник / Уклад. Рудика В., Брайловська Н., Зінгерман Ю., Коцюба Г., Шаповал Ю., Шевгота А. – Харків, 2007. – 504 с. – Диск із електронною версією. [60 000 слів]

13. Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури / Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ; за заг. ред. Р. А. Шмига. — Львів, 2010.

14. Чертов А.Д. Паралельний інжиніринг при безперервному вдосконаленні бізнес-процесів і базових систем управління в металургії // *Металург.* – 2003. - №7. – с. 47-61.

15. Самофалов, В. В., & Ходикін, В. Ф. (2011). Інформаційні технології як основа побудови системи управління металургійного підприємства. *Моделювання регіональної економіки*, (2), 77-85.

16. Руденська, В. В., Левицький, С. І., & Михайлик, Д. П. (2016). Моделі інформаційної підтримки процесів інтеграції у металургійній галузі. *Часопис економічних реформ*, (4), 34-40.

17. Рибалко, Л. П. (2015). Застосування сучасних корпоративних інформаційних систем в управлінні підприємствами. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки*, (15 (3)), 82-85.

18. Грабовський Г.Г. Інтегровані автоматизовані системи керування товстолистовими прокатними станами (розвиток теорії, моделі, алгоритми): автореферат дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.13.07 “Автоматизація процесів керування”/ Г.Г. Грабовський. — Д., 2003. — 35 с.

19. Різніченко Л.В. Досвід упровадження корпоративних інформаційних систем управління на вітчизняних підприємствах. Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. 2009. Вип. 4(57). Ч.2. С.184-189.

20. Гейзер Г. К. Проблеми підвищення ефективності внутрішньозаводського планування // Проблеми економіки та управління у промислових регіонах : матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Маріуполь, 2009. – С. 111–112.

21. Iancu, E. & Cibotariu, I. (2013). Theoretical and experimental research on the use of expert systems (ES) in assessing risks of failure in metallurgical companies, *Metalurgija*, 52(2), pp. 279-281. URL: <https://hrcak.srce.hr/92688> (дата доступу: 18.06.2023.)

22. Ganesh, R. ‘Expert System Applications in Sheet Metal Forming’. *Expert Systems, InTech*, 2010. <http://doi.org/10.5772/7074>.

23. Gefrerer, R. ; Kraft, G. ; Busch, S. ; Winterhalder, L. ; Garbracht, K. ; Wiese, T.. (2000). Supply Chain Management in the steel industry. – *Stahl-und-eisen*. V. 120. 31-36.

24. Интегрированная автоматизированная система оперативного управления производством труб большого диаметра / Б.С. Иванов, М.Е. Гетманова, Г.А. Филиппов [и др.] // *Сталь*. – 2003. - №6. – с. 111-114.

25. Shanmugam, S.P.; Nurni, V.N.; Manjini, S.; Chandra, S.; Holappa, L.E.K. Challenges and Outlines of Steelmaking toward the Year 2030 and Beyond—Indian Perspective. *Metals* 2021, 11, 1654. <https://doi.org/10.3390/met11101654>

26. Zhou, D.; Xu, K.; Lv, Z.; Yang, J.; Li, M.; He, F.; Xu, G. Intelligent Manufacturing Technology in the Steel Industry of China: A Review. *Sensors* 2022, 22, 8194. <https://doi.org/10.3390/s22218194>

27. Boto, F.; Murua, M.; Gutierrez, T.; Casado, S.; Carrillo, A.; Arteaga, A. Data Driven Performance Prediction in Steel Making. *Metals* 2022, 12(2), 172; <https://doi.org/10.3390/met12020172> .
28. Dering, D., Swartz, C., and Dogan, N., Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation, *Processes*, 2020, vol. 8, no. 4, p. 483. <https://doi.org/10.3390/pr8040483>
29. Fei, H.; Xianyi, C.; Zhenghai, Z. Prediction of oxygen-blowing volume in BOF steelmaking process based on BP neural network and incremental learning. *High Temp. Mater. Process.* 2022, 41, 403–416. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0035>
30. Feng, K., Yang, L., Su, B., Feng, W., and Wang, L., An integration model for converter molten steel end temperature prediction based on Bayesian formula, *Steel Res. Int.*, 2022, vol. 93, no. 2, p. 2100433. <https://doi.org/10.1002/srin.202100433>
31. Hongwei, G.; Jianliang, Z.; Haibin Z. and Xu, Z. "Application of Clustering Algorithm to Blast Furnace Expert System," 2009 International Conference on Advanced Computer Control, Singapore, 2009, pp. 171-175, doi: <https://doi.org/10.1109/ICACC.2009.80> .
32. Zagorskina, E. V.; Barbasova T. A. and Shnaider, D. A. "Intelligent Control System of Blast-furnace Melting Efficiency," 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, 2019, pp. 0710-0713, doi: <http://10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958221> .
33. Van De Putte, L.; Haers, F.; Haers, L.; Vansteenkiste H. Expert system for the control of liquid steel production at Sidmar / *Rev. Met. Paris*, Vol. 96, Issue 6, (1999), pages 721-728, <https://doi.org/10.1051/metal/199996060721>
34. Stein, E. W.; Pauster, M. C. and May, D. A knowledge-based system to improve the quality and efficiency of titanium melting / *Expert Systems with Applications*. Vol. 24. Issue 2, 239 p. (2003) [https://doi.org/10.1016/S0957-4174\(02\)00152-5](https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00152-5)
35. Zarandi, M.H.F.; Avazbeigi, M.; Anssari M.H. and Ganji B. (2010) A Multi-Agent Expert System for Steel Grade Classification Using Adaptive Neuro-fuzzy Systems, *ExpertSystems, InTech*, URL: <http://www.intechopen.com/books/expert->

[systems/a-multi-agent-expert-system-for-steel-grade-classification-using-adaptive-neuro-fuzzy-systems](#) (дата доступу 18.06.2023).

36. Laha, D.; Ren, Y.; Suganthan, P.N. Modeling of steelmaking process with effective machine learning techniques, *Expert Systems with Applications*, Volume 42, Issue 10, 2015, Pages 4687-4696, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.030>

37. Xie, Q.; Suvarna, M.; Li, J.; Zhu, X.; Cai, J.; Wang, X. Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning, *Materials & Design*, Volume 197, 2021, 109201, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109201>

38. Ткачова А.В. Імітаційне моделювання як інструмент удосконалення логістичної діяльності металургійного підприємства / Бюлетень Міжнародного Нобелівського економічного форуму. 2011. № 1 (4). – С. 413–422.

39. Graham R.L. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey / R.L. Graham, E.L. Lawler, J.K. Lenstra, A.E.G. Rinnooy Kan // *Ann. Discrete Math.* – №5. – 1979. – pp.. 287–326.

40. *Combinatorial Optimization Problems in Planning and Decision Making: Theory and Applications* / Mikhail Z. Zgurovsky, Alexander A. Pavlov. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019. – XIV, 518 p. : ill. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98977-8>.

41. I. Lustig, Progress in Linear and Integer Programming and Emergence of Constraint Programming, *Foundations of Computer-Aided Operations (FOCAPO) 2003*, 133-151. URL: <http://focapo.cheme.cmu.edu/2003/PDF/IrvFOCAPO.pdf>

42. L. Zeballos and G.P. Henning, A Constraint Programming Approach to the Multi-Stage Batch Scheduling Problem, *Foundations of Computer-Aided Operations (FOCAPO)*, 2003, 343-346. URL: https://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/focapo_2003/pdf/papers/048.pdf

43. Helsgaun K. An effective implementation of the Lin–Kernighan traveling salesman heuristic / K. Helsgaun // *European Journal of Operational Research.* – 2000. – Vol. 126 (1). – P. 106 – 130.

44. *Chu, Yunfei; You, Fengqi; Wassick, John M. (2014). "Hybrid method integrating agent-based modeling and heuristic tree search for scheduling of complex*

batch processes". *Computers & Chemical Engineering*. 60: 277–296. [doi:10.1016/j.compchemeng.2013.09.004](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2013.09.004).

45. Chu, Yunfei; Wassick, John M.; You, Fengqi (2013). "Efficient scheduling method of complex batch processes with general network structure via agent-based modeling". *AIChE Journal*. 59 (8): 2884–2906. [doi:10.1002/aic.14101](https://doi.org/10.1002/aic.14101).

46. Dorigo M. *Ant system: optimization by a colony of cooperating agents* / M. Dorigo, V. Maniez-zo, A. Colorni // *Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*. – 1996. – Vol. 26 (1). – P. 29 – 41.

47. Dorigo M. *Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem* / M. Dorigo, L.M. Gambardella // *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*. – 1997. – Vol. 1 (1). – P. 53 – 66.

48. Stutzle Th. *Max-min ant system* / Th. Stutzle, H.H. Hoos // *Future Generation Computer Systems*. – 2000. – Vol. 16 (8). – P. 889 – 914.

49. Villalonga, A.; Negri, E.; Biscardo, G.; Castano, F.; Haber, R.E.; Fumagalli, L.; Macchi, M. (January 2021). "A decision-making framework for dynamic scheduling of cyber-physical production systems based on digital twins". *Annual Reviews in Control*. 51: 357–373. [doi:10.1016/j.arcontrol.2021.04.008](https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.04.008).

50. Zgurovsky, M. Z., and A. A. Pavlov. "Intractable problems of combinatorial optimization in planning and decision making." Kiev: Nauk. dumka (2016).

51. Слесарев В.В. Інтегровані системи керування багатостадійним металургійним виробництвом на прикладі прокатки труб / В.В. Слесарев, Т.А. Желдак // *Системні технології*. – 2011. – N 4. – С. 77–84.

52. Парфьонова, І. М. Проектування експертної системи мережевого планування роботи обладнання в сталеплавильному цеху машинобудівного підприємства. *Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, 2011, 2: 238-245.

53. Stohl, K.; Snopek, W.; Weigert, Th.; Moritz, Th. Development of a Scheduling Expert System for a Steelplant, *IFAC Proceedings Volumes, Volume 25, Issue 17, 1992, Pages 39-44*, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-041704-2.50015-7>

54. Santos J.L. Application of the Two-Stage One-Dimensional Cutting Stock Problem in the Steel Industry / Santos, José Luis, Joni Santos, Manuel João Ferreira, Nelson Alves, and Miguel Guevara // 2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Cairns, QLD, 2018, pp. 683-690. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2018.8433734>

55. Гуляницький Л.Ф. Прикладні методи комбінаторної оптимізації: навч. посіб. / Л.Ф. Гуляницький, О.Ю. Мулеса. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2016. – 142 с.

56. Sezer Z. Two-Stage Cutting Stock Problem with Due Dates / Zeynep Sezer, İbrahim Muter // A. Fink, A. Fügenschuh, M. Geiger (eds) Operations Research Proceedings 2016. Operations Research Proceedings (GOR (Gesellschaft für Operations Research e.V.)). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55702-1_20.

57. Arbib C. On cutting stock with due dates / C. Arbib, F. Marinelli // Omega. 2014. T. 46. pp. 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.01.004>

58. Powar P.L. Comparative study of various algorithms dealing with computational aspects of one-dimensional cutting stock problem / P. L. Powar, Siby Samuel // Advances in Computational Sciences and Technology 10, no. 3 (2017). pp. 409-422. URL: http://www.ripublication.com/acst17/acstv10n3_07.pdf

59. Alves, C.J. A stabilized branch-and-price-and-cut algorithm for the multiple length cutting stock problem/ C.J. Alves, J.M.V. de Carvalho // Computers and Operations Research. – Vol. 35(4). – 2008. – pp. 1315-1328.

60. Gradisar, M. One-dimensional cutting stock optimization with usable leftover: A case of low stock-to-order ratio / Miro Gradisar, Jure Erjavec, and Luka Tomat // International Journal of Decision Support System Technology (IJDSST). Vol. 3.1. – 2011. – pp. 54-66.

61. E. G. Coffman, M. R. Garey, and D. S. Johnson. Approximation Algorithms for Bin Packing: A Survey. In Approximation Algorithms for NP-Hard Problems, Dorit S. Hochbaum (editor), PWS Publishing Company, 1997, pp. 46-93.

62. Cherri, A.C. The one-dimensional cutting stock problem with usable leftover - A heuristic approach / A.C. Cherri, M.N. Arenales, H.H. Yanasse // *European Journal of Operational Research*. – Vol. 196(3). – 2009. – pp. 897-908.

63. Кормен Т. Г. Вступ до алгоритмів / Томас Г. Кормен, Чарлз Е. Лейзерсон, Роналд Л. Рівест, Кліфорд Стайн — К. : К. І. С., 2019. — 1288 с.

64. Sarkar, D.; Modak, J. M. Pareto-optimal solutions for multi-objective optimization of fed-batch bioreactors using nondominated sorting genetic algorithm, *Chemical Engineering Science*, Volume 60, Issue 2, 2005, Pages 481-492, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.07.130>

65. Belov G. A cutting plane algorithm for the one-dimensional cutting stock problem with multiple stock lengths / G. Belov and G. Scheithauer // *European Journal of Operational Research*, vol. 141, no. 2, pp. 274-294, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00125-X)

66. Богушевський, В. С. Розрахунок металеві частини шихти киснево-конвертерної плавки / В.С. Богушевський, В.Ю. Сухенко, К.О. Сергеева, С.В. Жук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 7. – С. 266 – 269.

67. Желдак Т.А. Математична модель матеріально-теплового балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // *Інформаційні технології в освіті, науці й техніці (ІТОНТ-2012): матеріали міжнар. наук.-практ. конф.: Черкаси, 25-27 квітня 2012 р.* – Черкаси: ЧДТУ, 2012. – т.1. – с. 23-24.

68. Levitin, Anany. Introduction to the design & analysis of algorithms / Anany Levitin. —3rd ed. 2012. - 589p.

69. Гончаренко Я.В. Математичне програмування. — К.: НПУ імені М.П.Драгоманова, 2010. — 184 с.

70. Жалдак М.І., Триус Ю.В. Основи теорії і методів оптимізації.: Навчальний посібник. – Черкаси: Брама-Україна, 2005. – 608 с.

71. Комп'ютерна математика. Оптимізація обчислень [Текст] : зб. наук. пр. / відп. ред. І. В. Сергієнко ; НАН України, Ін-т кібернетики ім. В. М. Глушкова. - К., 2001 .

72. Субботін С. О., Олійник А. О., Олійник О. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія / Під заг. ред. С. О. Субботіна. — Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. — 375 с.

73. Das A. and Chakrabarti B. K. (Eds.), Quantum Annealing and Related Optimization Methods, Lecture Note in Physics, Vol. 679, Springer, Heidelberg (2005)

74. Bratton, Daniel; Kennedy, James (2007). Defining a Standard for Particle Swarm Optimization. Proceedings of the 2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS 2007). pp. 120–127. doi:10.1109/SIS.2007.368035

75. G. Karafotias, M. Hoogendoorn and A. E. Eiben, "Parameter Control in Evolutionary Algorithms: Trends and Challenges," in IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 19, no. 2, pp. 167-187, April 2015, doi: 10.1109/TEVC.2014.2308294.

76. Lucinska M., Wierzchon S.T. Hybrid Immune Algorithm for Multimodal Function Optimization // Recent Advances in Intelligent Information Systems, 2009, pp. 301-313. [Електронний документ] Доступний за URL: <http://iis.ipipan.waw.pl/2009/proceedings/iis09-30.pdf> .

77. Rowan T.H. Functional Stability Analysis of Numerical Algorithms, Ph.D. Thesis, Department of Computer Sciences, University of Texas at Austin, 1990. [Електронний документ] Доступний за URL: http://reference.kfupm.edu.sa/content/f/u/functional_stability_analysis_of_numeric_1308737.pdf .

78. Bernardino, H.S.; Barbosa, H.J.C. (2009). Artificial Immune Systems for Optimization. In: Chiong, R. (eds) Nature-Inspired Algorithms for Optimisation. Studies in Computational Intelligence, vol 193. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-00267-0_14

79. Yıldız, A. R. A novel hybrid immune algorithm for global optimization in design and manufacturing, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volume 25, Issue 2, 2009, Pages 261-270, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.08.002>
80. Navarro-Caceres, M.; Herath, P.; Villarrubia, G.; Prieto-Castrillo, F.; Venyagamoorthy, G.K. "An Evaluation of a Metaheuristic Artificial Immune System for Household Energy Optimization", *Complexity*, vol. 2018, Article ID 9597158, 11 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9597158>
81. Fernandez-Marquez, J.L., Di Marzo Serugendo, G., Montagna, S. et al. Description and composition of bio-inspired design patterns: a complete overview. *Nat Comput* 12, 43–67 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11047-012-9324-y>
82. Lin, Q.; Zhu, Q.; Wang, N. and al. A multi-objective immune algorithm with dynamic population strategy, *Swarm and Evolutionary Computation*, Volume 50, 2019, 100477, <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.12.003>
83. Li, L.; Lin, Q.; Ming, Zh. A survey of artificial immune algorithms for multi-objective optimization, *Neurocomputing*, Volume 489, 2022, Pages 211-229, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.08.154>
84. Qi, Y.; Hou, Zh.; Yin, M.; Sun, H. & Huang, J. An immune multi-objective optimization algorithm with differential evolution inspired recombination, *Applied Soft Computing*, Volume 29, 2015, Pages 395-410, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.01.012>
85. Liang, Zh.; Song, R.; Lin, Q.; Du, Zh.; Chen, J.; Ming, Zh. & Yu, J. A double-module immune algorithm for multi-objective optimization problems, *Applied Soft Computing*, Volume 35, 2015, Pages 161-174, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.06.022>
86. Poteralski, A. Hybrid artificial immune strategy in identification and optimization of mechanical systems, *Journal of Computational Science*, Volume 23, 2017, Pages 216-225, <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.04.015>
87. Cotta, C.; Schaefer, R. Bioinspired algorithms and complex systems, *Journal of Computational Science*, Volume 23, 2017, Pages 192-194, <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.11.010>

88. Yıldız, A. R. An effective hybrid immune-hill climbing optimization approach for solving design and manufacturing optimization problems in industry, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, Issue 6, 2009, Pages 2773-2780, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.028>

89. Chen, M.-R.; Zeng, G.-Q.; Lu, K.-D. A many-objective population extremal optimization algorithm with an adaptive hybrid mutation operation, *Information Sciences*, Volume 498, 2019, Pages 62-90, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.05.048>

90. Демидов В.О. Виробництво конвертерної сталі [Технологічна інструкція] ТІ-233-СТ КК-02-2012/ В.О. Демидов– Дніпропетровськ: ДМЗ – 2012. – 148 с.

91. Богушевський В.С. Виробництво низькосірчанистих марок сталі в конвертерах / В.С. Богушевський, Л.О. Бредун // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: Збірник праць співробітників і студентів кафедри «Фізико-хімічні основи технології металів». – К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”. – 2008. – с. 84 – 91.

92. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / Чернега Д. Ф., Богушевський В. С., Готвянський Ю. Я. та ін. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. — К. : Вища школа, 2006. — 503 с.

93. Panteikov, S.P., Upper blowing devices of oxygen converters in Ukraine: State, problems, development prospects, *Sbornik nauchnykh trudov DGTU (tekhnicheskie nauki) (Transactions of DSTU (Technical Sciences))*, Dneprodzerzhinsk: Dneprodzerzhinskii Gos. Tekh. Univ., 2005, pp. 22–32.

94. Тогобицкая Д.Н. База данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали / Д.Н. Тогобицкая, В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С. В. Греков, И.Р. Снигура, Ю.М. Лихачев, Л. А. Головки // Сб.н.тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». –Днепропетровск. –2017. –Вып. 31. –С.150-165

95. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф. Чернеги, Ю.Я. Готвянського.- К.: Вища шк., 2006.-503 с.

96. Hofinger, S., Hubmer, R., and Schutt, S., Steel Expert takes command—Optimized performance on BOF converter, Technical contribution to the 16th Automation and Industrial IT Seminar, Rio de Janeiro, 2012, pp. 408–420. <https://doi.org/10.5151/2594-5335-22654>

97. Kabulova, E.G., Kosareva, I.N., Karpova, V.A., and Gridneva, G., Modeling of steel smelting in metallurgical production, Vestn. Nats. Tekh. Univ. Kharkovskii Politekh. Inst., 2015, no. 53, pp. 14–18.

98. Kolesnikov, Yu.A., Bigeev, V.A., and Sergeev, D.S., Modeling of steelmaking in BOF based on physical, chemical and thermal processes, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Chern. Metall., 2017, vol. 60, no. 9, pp. 698–705. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-9-698-705>

99. Kumari, V., Mathematical modelling of basic oxygen steel making process, Master's Thesis, Rourkela, 2015. <https://core.ac.uk/download/pdf/80148601.pdf> . Cited May 1, 2022.

100. Kolesnikov, Yu., Bigeev, V. Sergeev, D. (2017). Modeling of steelmaking in bof based on physical, chemical and thermal processes. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya. 60. 698-705. 10.17073/0368-0797-2017-9-698-705..

101. Kruskopf, A., Multiphysical modeling approach for basic oxygen steelmaking process, PhD Dissertation, Helsinki, Finland, 2018. <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/29573/isbn9789526077956.pdf?sequence=4&isAllowed=y> . Cited October 8, 2021.

102. Богушевський, В. С. Розрахунок металеві частини шихти киснево-конвертерної плавки / В.С. Богушевський, В.Ю. Сухенко, К.О. Сергеева, С.В. Жук // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 7. – С. 266 – 269.

103. Gao, C., Shen, M., Wang, L., and Chu, M., End-point static control of basic oxygen furnace (BOF) steelmaking based on wavelet transform weighted twin support vector regression, Complexity, 2019, vol. 2019, p. 7408725. <https://doi.org/10.1155/2019/7408725>

104. Камкіна Л.В. Моделювання впливу режиму продування ванни на масообмінні процеси та шлакоутворення у кисневому конвертері. / Камкіна Л.В., Мішалкін А.П., Камкін В.Ю., Мянговська Я.В., Дворковий О.І., Ісаєва Л.Є. // Теорія і практика металургії. - №1. - 2022. - С. 27-37.

105. Han M. Dynamic control model of BOF steelmaking process based on ANFIS and robust relevance vector machine / Min Han, Yao Zhao // Expert Systems with Applications. – Volume 38, Issue 12. – November–December 2011. – Pages 14786-14798. ISSN 0957-4174, 10.1016/j.eswa.2011.05.071.

106. Bogushevskij, V. S., Grabovskij, G. G., & Mihajlov, V. M. (2006). Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки [Computer model for calculating the charge and purge converter smelting]. *Stal'–Steel*, (1), 18-21.

107. Бойко В.С. Оптимизация раскисления стали с использованием данных об активности растворенного кислорода / В.С. Бойко, М.Н. Якин, С.А. Коваль, А.В. Стефанец, И.Н. Фентисов, А.А. Годынский, Е.А. Чичкарев // *Металл и литье Украины*. — 2012. — № 2-3. — С. 12-15.

108. Ruuska, J., Special measurements and control models for a basic oxygen furnace (BOF), PhD Dissertation, Oulu, Finland, 2012. <http://cc.oulu.fi/~kamahei/y/casr/vk/ruuska.pdf>. Cited August 10, 2021

109. Сергеева К.О. Математична модель та система керування температурного режиму конвертерної плавки: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування» / К.О. Сергеева. - Київ, 2013. - 22 с.

110. Sala, D.A., Van Yperen-De Deyne, A., Mannens, E. et al. Hybrid static-sensory data modeling for prediction tasks in basic oxygen furnace process. *Applied Intelligence* Vol. 53, Issue 12, 15163–15173 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10489-022-04293-7>

111. Sriram, M. V. V. N., Singh, N. K., & Rajaraman, G. (2010). Neuro fuzzy modelling of Basic Oxygen Furnace and its comparison with Neural Network and

GRNN models. 2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research. <https://doi.org/10.1109/ICCIC.2010.5705830>

112. Wang, R.; Mohanty, I.; Srivastava, A.; Roy, T.K.; Gupta, P.; Chattopadhyay, K. Hybrid Method for Endpoint Prediction in a Basic Oxygen Furnace. *Metals* 2022, 12, 801. <https://doi.org/10.3390/met12050801>

113. Gherfi, S.K., Bendjama, H., Bouhouche, S., and Meradi, H., Neural model identification of metallurgical process in oxygen converter, Proc. 12th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. of Modern Management of Mine Producing, Geology and Environmental Protection (SGEM 2012), Albena, 2012, vol. 1, pp. 683–690. <http://toc.proceedings.com/19962webtoc.pdf>. Cited May 1, 2022.

114. Li, A.; Li, C.; Wang, Y.; Cui, G.; Xie, S. Recognition of converter blowing periods based on improved DenseNet Network. *J. Univ. Jinan* 2022, 36, 273–277. <https://doi.org/10.13349/j.cnki.jdxbn.20220223.001>

115. Ji, Y.; Liu, S.; Zhou, M.; Zhao, Z.; Guo, X.; Qi, L. A machine learning and genetic algorithm-based method for predicting width deviation of hot-rolled strip in steel production systems, *Information Sciences*, Volume 589, 2022, Pages 360-375, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.12.063>

116. Богушевський В.С. Керування киснево-конвертерною плавкою в замкненому режимі / В.С. Богушевський, С.В. Жук, Є.К. Бондаренко, О.О.Капусняк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – № 5. – С. 76 – 83.

117. Han, M.; Zhao, Y. Dynamic control model of BOF steelmaking process based on ANFIS and robust relevance vector machine. *Expert Syst. Appl.* 2011, 38, 14786–14798. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.071>

118. Nenchev, B.; Panwisawas, C.; Yang, X.; Fu, J.; Dong, Z.; Tao, Q.; Gebelin, J.-C.; Dunsmore, A.; Dong, H.; Li, M.; et al. Metallurgical Data Science for Steel Industry: A Case Study on Basic Oxygen Furnace. *Steel Res. Int.* 2022, 93, 2100813. <https://doi.org/10.1002/srin.202100813>

119. Dong, X. L., & Dong, S. (2014). The Converter Steelmaking End Point Prediction Model Based on RBF Neural Network. *Applied Mechanics and Materials*.

Vol. 577, pp. 98–101. Trans Tech Publications, Ltd.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.577.98>

120. Lu, B. H., Li, Y. K., & Qu, B. Z. (2013). Optimization Research on Converter Steelmaking Process Parameters Based on DOE. Key Engineering Materials. Vols. 579–580, pp. 128–132. Trans Tech Publications, Ltd.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.579-580.128>

121. Qian, Q.; Fang, X.; Xu, J.; Li, M. Multichannel profile-based anomaly detection and its application in the monitoring of basic oxygen furnace steelmaking process. J. Manuf. Syst. 2021, 61, 375–390.
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.010>

122. Rahnama, A.; Li, Z.; Sridhar, S. Machine Learning-Based Prediction of a BOS Reactor Performance from Operating Parameters. Processes 2020, 8, 371.
<https://www.mdpi.com/2227-9717/8/3/371/pdf>

123. Togobitskaya D.N. Prediction of Ferroalloy Properties for Expert Evaluation of the Efficiency of their Use During Addition to Steel in a Ladle Furnace Unit / Togobitskaya D.N., Piptyuk V.P., Petrov A.F., Grekov E.V., Mirgorodskaya A.S. // Metallurgist. –2019. Vol 62. No (11-12). pp. 1115-1122

124. Sala, D. A.; Jalalvand, A.; Van Yperen-De Deyne A. and Mannens, E. "Multivariate Time Series for Data-Driven Endpoint Prediction in the Basic Oxygen Furnace," 2018, 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), Orlando, FL, USA, 2018, pp. 1419-1426, doi: <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00231> .

125. Chen, Y., Liang, X. T., Zeng, J. H., Chen, J., & Liu, R. D. (2011). Numerical Simulation and Optimization Practice of Oxygen Lance for Converter Steelmaking. Advanced Materials Research. Vol. 402, pp. 156–159. Trans Tech Publications Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.402.156>

126. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних моделях складних об'єктів та систем / Т.А. Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції

SAIT 2011, Київ, 23-28 травня 2011 р. – К.: ННТ “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2011. – с. 244.

127. Желдак Т.А. Застосування методів формування знань в складі інтелектуальної СППР оптимізації процесу розкислення сталі в конвертерному виробництві / Т.А. Желдак, В.В. Слесарєв, Д.О. Воловенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 3 (86). - Дніпропетровськ, 2013. - с. 29 - 39.

128. Гаранжа Д.М. Система статистичного контролю якості прокатної продукції / Д.М. Гаранжа // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2011, Київ, 23–28 травня 2011 р. / ННТ “ІПСА” НТУУ “КПІ”. – К.: ННТ “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2011. – с. 216.

129. Каталог продукції ПАТ «Інтерпайп–НТЗ» [Електронний документ] Доступний за URL: <http://www.interpipe.biz/files/General-rus-25112008.pdf>

130. Демидов В.О. Виробництво сортового прокату в прокатному цеху №2 [Технологічна інструкція] ТІ–251–СП ПР–02–2015 // В.О. Демидов. – Дніпропетровськ: ДМЗ ім. Петровського. – 2015. – 260 с.

131. Каталог продукції ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [Електронний документ] Доступний за URL: <http://www.arcelormittal.com/kryviyrih/index.php?id=56>

132. Kačur J, Flegner P, Durdán M, Laciak M. Prediction of Temperature and Carbon Concentration in Oxygen Steelmaking by Machine Learning: A Comparative Study. Applied Sciences. 2022; 12(15):7757. <https://doi.org/10.3390/app12157757>

133. Terpák, J.; Laciak, M.; Kacur, J.; Durdán, M.; Flegner P. and Tréfa, G. "The Mathematical Model for Indirect Measurement of Carbon Concentration in the Steelmaking Process and its Utilization in Process Control," 2021 22nd International Carpathian Control Conference (ICCC), Velké Karlovice, Czech Republic, 2021, pp. 1-4, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCC51557.2021.9454605>.

134. Альперович Я.Л. Розробка та освоєння регламентованого шихтового режиму конверторної плавки. Дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук за

спец. 05.16.02 – «Металургія чорних металів». – Дніпропетровськ: НМетАУ. – 2002.

135. Воронина О.Б. Повышение стойкости периклазоуглеродистой футеровки кислородного конвертера из изделий отечественного производства: автореф. дис. на соиск. науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.16.02 – «Металургия черных, цветных и редких металов» / О.Б. Воронина. - Магнитогорск, 2003. - 22 с.

136. Bock M. Metallurgy and Lining Life in Basic Oxygen Converters / Manfred Bock, Christian Oehler // Millenium Steel. – 2006. – p. 103-109. URL: <http://docshare02.docshare.tips/files/4454/44544273.pdf> Дата доступа: 23.08.2020.

137. Шибко А.В. Влияние скачивания шлака на показатели работы 60-тонных конвертеров верхнего кислородного дутья / А.В. Шибко, В.И. Пищида, А.С. Заспенко, С.М. Онацкий, В.И. Шпак, К.Ф. Чмырков // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 3(268) – 2011. – с.17-18.

138. Мокринский А.В. Гидродинамические режимы взаимодействия кислородных струй с конвертерной ванной / А.В. Мокринский, Е.В. Протопов, А.Г. Чернятевич – Изв. Вузов. – Черная металлургия. – 2005. №4. – С. 11-17

139. Износ периклазоуглеродистых огнеупоров в конвертере при изменении типа их антиоксидантов / С.Б. Бойченко, Д.П. Васильев, Б.М. Бойченко, Л.С. Молчанов // Бюллетень НТИЭИ Черная металлургия. – 2016. – No 5. – С.57-60.

140. Wang, D., Bao, Y., Gao, F. and Xing, L. (2023), Hybrid Model for Predicting Oxygen Consumption in BOF Steelmaking Process Based on Cluster Analysis. steel research int., 94: 2200595. <https://doi.org/10.1002/srin.202200595>

141. Karabeliov, K.; Cuéllar, P.; Baeßler, M.; Rücker, W. System identification of inverse, multimodal and nonlinear problems using evolutionary computing – Application to a pile structure supported on nonlinear springs, Engineering Structures, Volume 101, 2015, Pages 609-620, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.034>

142. Zou, L.; Zhang, J.; Han, Y.; Zeng, F.; Li, Q.; Liu, Q. Internal Crack Prediction of Continuous Casting Billet Based on Principal Component Analysis and

Deep Neural Network. *Metals* 2021, 11(12), 1976; <https://doi.org/10.3390/met11121976> .

143. Berry, Michael J. A. *Data mining techniques : for marketing, sales, and customer relationship management* / Michael J.A. Berry, Gordon Linoff.— 2nd ed. // Wiley Publishing Inc. – 2004. – 644 p.

144. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. / Рутковская Д., Пилиньский М, Рутковский Л. М.: Горячая линия-Телеком, 2004, 452 с.

145. Witten, I. H. *Data mining : practical machine learning tools and techniques*. – 3rd ed. / Ian H. Witten, Frank Eibe, Mark A. Hall // Morgan Kaufmann Publishers is an imprint of Elsevier. – 2011. – 630 p.

146. Горбійчук М.І. Метод побудови математичних моделей складних процесів на засадах генетичних алгоритмів / М.І. Горбійчук, М.А. Шуфнарівич // *Искусственный интеллект*. – 2010. - № 4. – с. 50-57.

147. Chen, L.; Huang, B.; Liu, F. Nonlinear system identification with multiple and correlated scheduling variables, *IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 32, 2013, Pages 319-324*, <https://doi.org/10.3182/20131218-3-IN-2045.00055>

148. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ 3-е изд. / Н. Дрейпер, Г. Смит [Пер. с англ.] – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2007. – 912 с.: ил.

149. Барсегян А.А. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP: / А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ – Петербург, 2007. – 384 с.: ил.

150. Снитюк В.Є. Прогнозування. Моделі, методи, алгоритми. – К.: Маклаут, 2008. – 364 с.

151. Загоруйко, Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний // Новосибирск: Изд-во Ин-та математики. – 1999. – 268 с.

152. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем: [монографія] / А.Г. Ивахненко. – К. : Наукова думка, 1981. – 296 с.

153. Степашко В.С., Булгакова О.С., Зосімов В.В. Ітераційні алгоритми індуктивного моделювання: [монографія]. — Київ : Наукова думка, 2018.
154. Volodymyr Stepashko, Oleksandra Bulgakova, Viacheslav Zosimov. Construction and research of the generalized iterative GMDH algorithm with active neurons // Conference on Computer Science and Information Technologies. — Springer, Cham, 2017. — С. 492-510.
155. Зайченко Ю.П. Основи проектування інтелектуальних систем. — К.: Видавничий дім «Слово», 2004. — 352 с.
156. Rajaraman, A. Mining of massive datasets. / Anand Rajaraman, Jeffrey David Ullman // Cambridge University Press. - 2011. – 330 p.
157. Гаранжа Д.М. Система статистичного контролю якості прокатної продукції / Д.М. Гаранжа // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2011, Київ, 23–28 травня 2011 р. / ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”. – К.: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2011. – с. 216.
158. Швайка Л.А. Планування діяльності підприємства: навчальний посібник/ Л.А.Швайка. – Львів. «Новий Світ», 2003.- 268с.
159. Sidnev A., Tuominen J., Krassi B. Business Process Modeling and Simulation / Helsinki University of Technology. Industrial Information Technology Laboratory Publications, 2005. – 116 p.
160. Кулик І. М. Сучасний стан та основні фактори розвитку чорної металургії в Україні / І. М. Кулик // Бізнес Інформ. – 2012. – № 5. – С. 116–121.
161. Чайковська, М. А., Пімонова, К. А. (2015). Оцінка ефективності діяльності підприємств чорної металургії України. Наука й економіка, (2), 89-95.
162. Порівняння ефективності діяльності підприємств гірничо-металургійних корпоративних структур України / В. Колосок, М. Верескун, К. Дроботіна, Ю. Угровата // Схід. — 2012. — № 1 (115). — С. 43-49. — Бібліогр.: 14 назв. — укр.
163. Барабаш О. В. Основи забезпечення функціональної стійкості інформаційних систем підприємств в умовах впливу дестабілізуючих факторів. /

Барабаш О.В., Мусієнко А.П., Собчук В.В. – Київ: Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, 2022. –282 с.

164. Syreyshchikova N.V., Pimenov D.Yu., Mikolajczyk T., Moldovan L. Automation of Production Activities of an Industrial Enterprise based on the ERP System, *Procedia Manufacturing*, V. 46, 2020, Pages 525-532, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.075> .

165. *Металургійне виробництво/ Фізичні та хімічні основи галузевого виробництва: Навчальний посібник.* / Смирнов В. О., Білецький В. С. — «Новий Світ-2000», ФОП Піча С. В., 2022. — 148 с.

166. Авраменко В.С., Авраменко А.С. *Проектування інформаційних систем: навчальний посібник.* – Черкаси: Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, 2017. – 434 с.

167. Смірнов, О. М., Тімошенко, С. М., & Нарівський, А. В. (2023). Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та європейського зеленого курсу. *Вісник НАН України*, (4), 21-38.

168. *World Steel in Figures 2019.* Brussels: World Steel Association, 2019. 17 р.

169. Воловенко Д.О. Факторний аналіз процесу виготовлення товарної продукції в умовах прокатного цеху №1 ДМЗ ім. Петровського / Д.О. Воловенко, Т.А. Желдак // *Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 26-30 травня 2009 р.* – К.: НТУУ “КПІ”. – 2009. – с. 307.

170. Технологічні можливості ЕСПК «Інтерпайп–сталь» [Електронний документ] Доступний за URL: <http://www.interpipe.biz/ru/company/steel/infrojects/>

171. Селиверстов А.Е. Модель процесса выполнения потребительских заказов на металлургическом предприятии // *Новое в экономической*

кибернетике (сб. науч. ст.) / Моделирование логистических систем. – 2008. – №3. – С. 15–26.

172. Патоков О.Ф. Проблемы интеграції в управлінні виробництвом / Автореф. дис. д-ра екон. наук: 08.02.03. – Дніпропетровськ: Дніпропетр. держ. ун-т, 1998. – 32 с.

173. Желдак Т.А. Планування виконання замовлень металургійними підприємствами на основі розв'язків комбінаторних задач / Т.А. Желдак // Мат. IV Всеукр. наук.–практ. конф. "Інформатика та системні науки" ІСН – 2013. Полтава, 21–23 березня 2013 р. – Полтава: «Видавництво». – 2013. – с. 125 – 128.

174. Шев'яков В.О. Програмна підтримка прийняття рішень при виборі маршруту прокатки безшовних труб в умовах «НТЗ–Інтерпайп» / В.О. Шев'яков, Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Системний аналіз та інформаційні технології: матер. Міжнар. Наук.–техн. конф. SAIT 2011, Київ, 23–28 травня 20091 р. / ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ". – К.: ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ", 2009. – с. 410.

175. Желдак Т.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером / Т.А. Желдак, Д.А. Воловенко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2011. - №5 – с. 133–136.

176. Слесарев В.В. Математична модель матеріально-теплого балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / В.В. Слесарев, Т.А. Желдак // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. - №1 – с. 97–102.

177. ДСТУ EN 10020:2007. Сталі. Визначення й класифікація (EN 10020:2000, IDT)

178. Нестеров М.Е. Повышение эффективности устаревшего производства с помощью современных самообучающихся систем поддержки принятия решений на примере кислородно-конвертерного цеха ДМЗ им. Петровского / М.Е. Нестеров, Т.А. Желдак // Збірник наукових праць НГУ – Д.: НГУ. – 2010. - №34, т. 2. – с. 202-207.

179. Желдак Т.А. Використання систем самонавчання для ідентифікації марки сталі в киснево-конвертерному виробництві / Т.А. Желдак, Н.А. Кучеренко // Науковий вісник НГУ – Д.: Національний гірничий університет. – 2011. - №1. – с. 94-98.
180. Желдак Т.А. Оптимальне одновимірне розкроювання матеріалу у прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* — 2009. — N 4. — С. 43-46. — Бібліогр.: 7 назв. — укр.
181. Hajizadeh, I. Alternative configurations for cutting machines in a tube cutting mill / Iman Hajizadeh, Chi-Guhn Lee // *European Journal of Operational Research.* – 2007. – Vol. 183(3). – pp. 1385-1396.
182. Сумский С.Н. *Металлосберегающие технологии раскроя проката // Сталь.* – 2003. – №6. – с.236-242.
183. Светличный А.В., Азин Е.Л., Достлев Ю.С., Минтус А.Н. Система управления раскромом металла // *Металл и литье Украины.* – 2006. – № 7-8.
184. Santos J.L. Application of the Two-Stage One-Dimensional Cutting Stock Problem in the Steel Industry / Santos, José Luis, Joni Santos, Manuel João Ferreira, Nelson Alves, and Miguel Guevara // 2018 IEEE 27th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Cairns, QLD, 2018, pp. 683-690. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2018.8433734>
185. Hnatushenko, V. V. Mathematical Model Of Steel Consumption Minimization Considering The Two-Stage Billets Cutting / V. V. Hnatushenko, T. A. Zheldak, L. S. Koriashkina // *Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk,* 2021, 2: 118-124. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/118>
186. Сердюков А.А. Современная футеровка для крупных кислородных конвертеров / А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, А.Н. Смирнов // *Металл и литье Украины.* – 2010. – № 9-10. – С. 4-7.
187. Dorn, J. Guest Editor's Introduction: Expert Systems in the Steel Industry / Jürgen Dorn // *IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications.* – Vol. 11.1 – 1996. – pp. 18-21.

188. Poirier J. Recent tendencies in refractories in relation with service conditions in the steel industry // XXXIX-th International colloquium on refractories, Aachen – 24-25 september 1996. – P. 6-16.

189. Старов Р.В. Испытания кислых огнеупоров для футеровки кислородных конвертеров / Р.В. Старов, В.И. Дрозд, В.И. Пищида // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2002. – №7. – С.225-227.

190. Смирнов А. Н. Конвертерный металл // *Металл бюллетень, Украина*. – 2007. – № 4 (125). – С. 64-74.

191. Зражевский А.Д. Анализ причин износа футеровки конвертера / А.Д. Зражевский, Я.Л. Альперович, Ю.Г. Егоров, В.Б. Охотский // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – №3-4. – 1996. – с. 16- 18.

192. Гуденау Х.В. Методы исследования характера износа огнеупорных футеровок конвертеров. Х.В. Гуденау, Х. Нефе, Р. Хёффкен, А. Бааске, Р. Бертлинг. // *Черные металлы* № 5, 1997. С 23 29.

193. Комшуков В.П. Совершенствование технологии производства конвертерной стали / В.П. Комшуков, В.В. Соколов, В.М. Машинский, А.И. Щипанов // *Сталь*. – 2004. – № 5. – С. 27-28.

194. Sian C. Slag Splashing for Bao Steel's 300-Metric Ton BOF and Crystallographic Structure of its Slag / C. Sian, Y. Wenyuan, Z. Congjie // *Iron and Steelmaker*. – 2000. – № 7. – P. 39-41.

195. Суворов С.А. Динамика образования гарнисажного слоя на поверхности футеровки конвертера и ресурс эксплуатации / С.А. Суворов, В.В. Козлов // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2009. – № 7-8. – с. 86–89.

196. Бабенко А.А. Выбор рациональных направлений повышения износоустойчивости магнезиальной футеровки конвертеров // *Новые огнеупоры*. – 2005. – № 1. – С. 26-28.

197. Охотский В.Б. Влияние скачивания шлака на некоторые параметры кислородно-конвертерного процесса / В.Б. Охотский, Я.Л. Альперович, В.И. Пищида, А.В. Шибко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – №4. – 1997. – с. 24-26.

198. Kumar D. S., Prasad G., Vishwanath S. C., Ghorui P. K., Mazumdar D., Ranjan M., Lal P. N. Converter life enhancement through optimization of operating practices // *Iron and Steelmaker*. – 2007. – № 6. – P. 521-528.

199. Искусственные иммунные системы и их применение / [под ред. Д. Дасгупты] – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006 – 344 с.

200. The NLOpt nonlinear-optimization package. [Электронный документ] Доступный за URL: <http://ab-initio.mit.edu/wiki/index.php/NLOpt> .

201. Molga M., Smutnicki C. Test functions for optimization needs. 2005. [Электронный документ] Доступный за URL: <http://www.zsd.ict.pwr.wroc.pl/files/docs/functions.pdf> .

202. De Castro L.N., Von Zuben F.J. Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, vol. 6, No. 3, pp. 231-259.

203. De Castro L.N., Timmis J. An Artificial Immune Network for Multimodal Function Optimization // *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'02)*, 2002, May, Hawaii, vol. 1, pp. 699-674. [Электронный документ] Доступный за URL: http://neuro.bstu.by/ai/To-dom/My_research/Papers-0/Etc-done/wais02.pdf .

204. Yildiz A.R. A novel hybrid immune algorithm for global optimization in design and manufacturing // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, vol. 25, pp. 261-270.

205. Kelsey J., Timmis J. Immune Inspired Somatic Contiguous Hypermutation for Function Optimisation, 2003. [Электронный документ] Доступный за URL: http://www.cs.york.ac.uk/rts/docs/GECCO_2003/papers/2723/27230207.pdf

206. Карпенко А. П. Гибридный метод глобальной оптимизации на основе искусственной иммунной системы / А.П. Карпенко, Д.Л. Шуров // *Инженерное образование* №8, 2012.

207. Литвиненко В. І. Методи та засоби гібридних штучних імунних систем в задачах інтелектуального аналізу даних. – Дис... докт.техн.н. – Львів, 2010.
208. Chen J. A hybrid immune multiobjective optimization algorithm / Jianyong Chen, Qiuzhen Lin, Zhen Ji // *European Journal of Operational Research*. 2010. – Vol. 204. – pp. 294–302.
209. Agiza H.N., Hassan A.E., Salah A.M. An Improved Version of opt-AiNet Algorithm (I-opt-AiNet) for Function Optimization // *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, March 2011, vol. 11, No. 3, pp. 80-85. [Електронний документ] Доступний за URL: http://paper.ijcsns.org/07_book/201103/20110313.pdf
210. Aragon V.S., Escuivel S.C., Coello Coello C.A. Solving Constrained Optimization using a T-Cell Artificial Immune System, 2008. [Електронний документ] Доступний за URL: <http://polar.lsi.uned.es/revista/index.php/ia/article/viewFile/579/563>
211. Nelder J. A., Mead R. A simplex method for function minimization // *The Computer Journal*, 1965, Vol. 7, p. 308-313.
212. de França F.O. An artificial immune network for multimodal function optimization on dynamic environments / F.O. de França, F.J.V. Zuben, L.N. de Castro // In: *Proc. of GECCO*. – ACM Press, New York. – 2005. - pp. 289–296. (2005).
213. Brownlee J., *Clonal Selection Algorithms / Technical Report 070209A*, Complex Intelligent Systems Laboratory (CIS), Centre for Information Technology Research (CITR), Faculty of Information and Communication Technologies (ICT), Swinburne University of Technology, 2007.
214. Navarro-Caceres M. An Evaluation of a Metaheuristic Artificial Immune System for Household Energy Optimization / Maria Navarro-Caceres, Pramod Herath, Gabriel Villarrubia, Francisco Prieto-Castrillo, G. Kumar Venyagamoorthy // *Complexity*, vol. 2018, Article ID 9597158, 11 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9597158>

215. Gong M. A population-based artificial immune system for numerical optimization / Maoguo Gong, Licheng Jiao, Xiangrong Zhang // *Neurocomputing*, Volume 72, Issues 1–3, 2008, Pages 149-161, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2007.12.041> .

216. Schmidt B. Optimizing an artificial immune system algorithm in support of flow-Based internet traffic classification / Brian Schmidt, Ala Al-Fuqaha, Ajay Gupta, Dionysios Kountanis // *Applied Soft Computing*, Volume 54, 2017, Pages 1-22, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.01.016>

217. Жураковський Я.Ю. Застосування математичних моделей та методів у системах MRP II, ERP, APS / Я.Ю. Жураковський, О.С. Жураковська // *Вісн. Нац. техн. ун-ту України "КПІ"* . – 2007. – Вип. 47. – С. 324–331. – Бібліогр.: 5 назв. – укр.

218. Желдак Т.А. Алгоритм роботи підсистеми розкроювання заготовок СППР керування багатостадійним прокатним виробництвом / Т.А. Желдак, І.К. Зіборов // *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2023: тези доповідей міжн. Ннаук.-практ. конф. (Дніпро, 22 березня 2023 р.)*. – Дніпро: УДУНТ, 2023. – с. 294 – 297. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.079

219. Слесарев В.В. Оптимізація розкроювання продукції прокатного виробництва з використанням методу пошуку із заборонами / Слесарев В.В., Желдак Т.А., Гаранжа Д.М., Станіна О.Д. // *Збірник наукових праць НГУ*. – 2010. - № 35, т.2 – с. 41-50.

220. Approximate solutions to bin packing problems. / Coffman, Edward G.; Csirik, János; Woeginger, Gerhard J. *Handbook of Applied Optimization*. ed. / Panos M. Pardalos; Mauricio G.C. Resende. New York : Oxford University Press, 2002. p. 607-615.

221. Желдак Т.А. Нечіткі множини в системах управління та прийняття рішень: навч. посіб. / Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна, С.А. Ус, за редакцією С.А. Ус; МОН України, НТУ «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2020. – 387 с.

222. Russel S.J. Artificial Intelligence: A Modern Approach, Stuart J. Russell & Peter Norvig, 4th Edition, Pearson Education, 2021

223. Бойченко Б.М., Охотський В.Б. Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, конструкції агрегатів: Підручник (укр. та рос. мовами).-Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-Вал», 2006.-454 с.

224. Гаранжа Д.М. Факторний аналіз впливу технологічних параметрів процесу гарячої прокатки на довжину розкату і побудова прогнозуючої моделі / Д.М. Гаранжа, Т.А. Желдак, М.В. Краєв // Д.: Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. — 2011. — N 1. — С. 44-49.

225. Васильев Д.Б. Исследование эффективности замены стального лома железорудными брикетами при выплавке / Д.Б. Васильев, С.В. Куберский, В.М. Кравченко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — 2009. — Вып. 28. — С. 269-275.

226. Графов А. В. Металлоемкость продукции металлургического производства и оценка эффективности инновационных технологий переработки лома и отходов черных металлов: Монография / А. В. Графов. – Воронеж: Изд-во «Наука–Юнипресс». – 2011. – 306 с.

227. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних моделях складних об'єктів та систем / Т.А. Желдак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 3. — С. 95–106.

228. Велічко А.В. Комбінаторний підхід до знаходження рівняння багатовимірної нелінійної регресії / А.В.Велічко // Комп'ютерні науки та інженерія: матеріали V Міжнар. конф. молодих вчених CSE-2011. – Львів Видавництво Львівської політехніки, 2011. – с. 150 – 153.

229. Желдак Т.А. Система підтримки прийняття рішень планування виробництва та контролю перебігу технологічного процесу [Текст] / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // 17-та Міжнародна конференція з автоматичного управління “Автоматика-2010”. Тези доповідей. Т. 1. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – с. 212-214.

230. Желдак Т.А. Застосування технології OLAP для ідентифікації параметрів складних технічних систем при багатоетапному виробництві / Т.А. Желдак // VI міжнародна школа-семінар - "Теорія прийняття рішень", Ужгород: "Інвізор" - 2012р., 118с.

231. Антоненко Н.А. Використання штучної нейронної мережі для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Антоненко Н.А., Т.А. Желдак // Праці VIII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2016. – с. 30-31.

232. Зінченко О.В. Побудова регресійної моделі стійкості футеровки кисневого конвертера / О.В. Зінченко, Т.А. Желдак // Матеріали міжнар. конф. «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)». – Київ, КНУ, 2017. – с. 232-233.

233. Антоненко Н.А. Використання методу групового врахування аргументів для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Н.А. Антоненко, Т.А. Желдак // Матеріали міжнар. конф. «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)». – Київ, КНУ, 2017. – с. 193-194.

234. Желдак Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають стійкість футеровки конвертера та побудова прогнозуючої моделі / Т.А. Желдак, Н.А. Антоненко // Системні технології. – Випуск 6 (131). - Дніпро, 2020. – с. 73-91. DOI: 10.34185/1562-9945-6-131-2020-08

235. Пантейков С.П. Анализ мирового развития и современное состояние технологий ошлакования футеровки кислородных конвертеров / С.П. Пантейков // Черная металлургия. – №6 – 2013. – с. 65-78.

236. Смирнов А.Н. Оптимизация показателей стойкости и снижение затрат на футеровку конвертера / А.Н. Смирнов, К.Е. Писмарев, А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, К.Н. Шарандин // Металл и литье Украины. – №11(222) – 2011. – с. 24-28.

237. Выплавка конвертерной стали. Технологическая инструкция. ТИ-230-С320-12. Днепродзержинск: ПАО «Днепровский металлургический комбинат им. Дзержинского», 2012. – 53 с.

238. Deo, B.; Overbosch, A.; Snoeijer, B.; Das, D.; Srinivas, K. Control of Slag Formation, Foaming, Slopping, and Chaos in BOF. *Trans. Indian Inst. Met.* 2013, 66, 543–554. <https://doi.org/10.1007/s12666-013-0306-2>]
239. Brämning, M.; Bjorkman, B.; Samuelsson, C. BOF process control and slopping prediction based on multivariate data analysis. *Steel Res. Int.* 2016, 87, 301–310. <https://doi.org/10.1002/srin.201500040>
240. Brooks, G.A., Dogan, N., Alam, M., Naser, J., and Rhamdhani, M.A., Developments in the modelling of oxygen steelmaking, *Univ. Wollongong Res. Online*, 2011, pp. 1–15. <https://ro.uow.edu.au/engpapers/1631> . Cited October 8, 2021.
241. Желдак, Т., Зіборов, І. (2022). Самонавчання підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі в складі СППР керування металургійним виробництвом. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 32–40. doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4> .
242. Dering, D., Swartz, C., and Dogan, N., A dynamic optimization framework for basic oxygen furnace operation, *Chem. Eng. Sci.*, 2021, vol. 241, p. 116653. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116653>
243. . Lior Rokach, Maimon O. *Data mining with decision trees: theory and applications.* — World Scientific Pub Co Inc, 2008. .
244. Gupta, Jatinder N.D. *Intelligent Decision-making Support Systems: Foundations, Applications and Challenges* / Jatinder N.D. Gupta, Guisseppi A. Forgionne, Manuel Mora. – Springer Science & Business Media, 2007. – pp.
245. Zheldak T.A. The algorithm of artificial immune system simulation with Saaty selection operator and one-dimensional local search / T.A. Zheldak, V.V. Slesarev & I.G. Gulina // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 5 (2016): 149-156.
246. Желдак Т.А. Метод моделювання штучної імунної системи в задачах оптимізації мультимодальних функцій [Текст] / Т.А. Желдак // *Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): Матеріали 2-ї міжнар. наук.-техн. конф. 14-17 травня 2013 р.* – Черкаси: Маклаут, 2013. – с. 33-36.

247. T.A. Zheldak “Application of the method of modeling the ant colony to the solution of combinatorial problems scheduling the execution of order by metallurgical plants”. *Mathematical Machines and Systems*. 4 (2013): 95–106.

248. V.V. Hnatushenko, T.A. Zheldak, L.S. Koriashkina “Mathematical Model Of Steel Consumption Minimization Considering The Two-Stage Billets Cutting”. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*. 2 (2021): 118-124. DOI:10.33271/nvngu/2021-2/118.

249. C-M. Pinteá, *Advances in Bio-inspired Computing for Combinatorial Optimization Problem*. Springer. *Intelligent Systems Reference Library*. 57 (2014). DOI:10.1007/978-3-642-40179-4

250. R. Rodrigues “A Simple Hack to Boost any Global Optimization Algorithm”, *Towards Data Science*. (2021). URL: <https://towardsdatascience.com/a-simple-hack-to-boost-any-global-optimization-algorithm-bdea461b87>

251. H. Maaranen, K. Miettinen & M.M. Makela “Quasi-Random Initial Population for Genetic Algorithms”, *Computers and Mathematics with Applications*. 47. (2004) 1885-1895. DOI: 10.1016/j.camwa.2003.07.011

252. OR-Library. The collection of test data sets for a variety of Operations Research (OR) problems. URL: <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>

253. Єгорова О.В. Багатовимірна технологія спрямованої оптимізації / О.В. Єгорова, В.Є. Снитюк // Міжнародна конференція “Computational intelligence”. К.: КНУ. – 2015. – с. 88–95.

254. Avramenko S.E. Guided hybrid genetic algorithm for solving global optimization problems / S.E. Avramenko, T.A. Zheldak, L.S. Koriashkina // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2 (2021): 174-188. DOI:10.15588/1607-3274-2021-2-18.

255. Gao Sh. Revisiting Immunological Algorithms for Numerical Optimization / Shangce Gao, Yuki Todo, Beibei Chen, Jianhong Chai // *IC: International Journal of Immune Computation*. 2013. Vol.1. Pages 9-17.

256. Deb, K., & Kumar, A. (1995). Real-coded Genetic Algorithms with Simulated Binary Crossover: Studies on Multimodal and Multiobjective Problems. *Complex Syst.*, 9.

257. W. Li, GG. Wang, & A.H. Gandomi “A Survey of Learning-Based Intelligent Optimization Algorithms”. *Arch Computat Methods Eng* (2021). DOI: 10.1007/s11831-021-09562-1.

258. Weiwei Zhang, Weizheng Zhang, Gary G. Yen & HongLei Jing “A cluster-based clonal selection algorithm for optimization in dynamic environment”, *Swarm and Evolutionary Computation*, 50 (2019): 100454, DOI: 10.1016/j.swevo.2018.10.005.

259. Zheldak T. Efficiency Improvement of the Algorithm Based on an Artificial Immune System Modeling Applied to Continuous and Combinatorial Problems / Zheldak, T., Ziborov, I., Lyman, V., Zhuk, A. // *CEUR Workshop Proceedings*, 2021, 3106, pp. 82–95.

260. Knuth D. *The Art of Computer Programming*. (2015). Vol. 4, Fascicle 6: Satisfiability. ISBN 978-0-134-39760-3.

261. Куваев В.Н. Принципы оптимального раскроя мелкосортного проката на полосы / В.Н. Куваев // *Науковий вісник Національної гірничої академії України*. – 2002. – № 2. – С. 88–91.

262. Uchitel, A.D., Tkachenko, G.I., Khizhnyak, V.Ya. and Mokhnatyι, A.V., (2013), *Sredstva i sistemy avtomatizatsii v gorno-metallurgicheskom komplekse* [Tools and Systems for Automation in the Mining and Metallurgical Complex], VPK “Ekspres-Poligraf”, Kiev.

263. Куваев В., Мещеряков Л., & Політов А. (2023). Розробка інтерфейса оператора складних інформаційно-керуючих систем критичних до режиму реального часу. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (1), 50-57.

264. Егоров, А. П., Кузьменко, М. Ю., Куваев, В. Н., & Хижняк, В. Я. (2012). Анализ потерь годного металла в обрезь и систем опимального раскроя.

265. Egorov, V., Egorov, O., Potap, O., Kryachko, O., Kuvaev, V., & Kuzmenko, M. (2016). Optimization of setting process of continuous sheet rolling. Metallurgical & Mining Industry, (6).

266. Бойко, О. О. (2021). Автоматизація процесу керування виходом мірної продукції на основі регулювання довжини прокату.

267. Кузьменко, М. Ю. (2021). Автоматизація процесів узгодженого керування розкромом прокату на безперервних сортових прокатних станах.

268. Рибальченко М. О., Єгоров О. П., Зворикін В. Б. Цифрова обробка сигналів : навчальний посібник. Дніпро : НМетАУ, 2018. 79 с.

269. Dunn William C. Fundamentals of industrial instrumentation and process control. McGraw-Hill Education, 2018. 338 p.

270. Ian Barkin, Jochen Wirtz, Pascal Bornet. Intelligent Automation: Learn how to harness Artificial Intelligence Learn how to boost business & make our world more human. 2021. 432 p.

271. Шендрик С. О. (2020) Моделі та інформаційна технологія підтримки прийняття рішень при управлінні гібридними енергомережами. – Дис. докт. філ. – СумДУ.

272. Мінц О. Ю. Методологія моделювання інноваційних інтелектуальних систем прийняття рішень в управлінні економічними об'єктами. – Дис. докт. ек. наук ДВНЗ «Приаз. держ. техн. ун-т», Маріуполь, 2017

ДОДАТКИ

Додаток А.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України

1. Желдак Т.А., Зіборов І.К. Структура та функції інтегрованої СППР у процесах керування багатоетапним прокатним виробництвом”, Сучасні інформаційні технології, vol.1, pp. 49–56, 2023.
2. Желдак, Т., Зібров, І. Самонавчання підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі в складі СППР керування металургійним виробництвом. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 2022, 2, 32–40. Doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4>.
3. Желдак Т.А. Система підтримки прийняття рішень про використання металу в багатоетапному прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна, Д.М. Гаранжа, Д.О. Сердюк // System technologies. N6 (137). Dnipro, 2021.– p. 85-98.
4. І.К. Зіборов, Т.А. Желдак Розробка інтелектуальної систем підтримки прийняття рішень з самонавчанням для керування технологічними процесами виробництва сталі / І.К. Зіборов, Т.А. Желдак // System technologies. N3 (140). Dnipro, 2022. – p. 35-46.
5. Желдак Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають стійкість футеровки конвертера та побудова прогнозуючої моделі / Т.А. Желдак, Н.А. Антоненко // System technologies. N 6 (131). - Dnipro, 2020. – p. 73-91. DOI: 10.34185/1562-9945-6-131-2020-08
6. Желдак Т.А. Застосування методів формування знань в складі інтелектуальної СППР оптимізації процесу розкислення сталі в конвертерному виробництві / Т.А. Желдак, В.В. Слесарєв, Д.О. Воловенко // System technologies. N3 (86). - Dnipropetrovsk, 2013. - p. 29 – 39.

7. Слесарев В.В. Интегрированные системы управления многоэтапным металлургическим производством на примере прокатки труб / В.В. Слесарев, Т.А. Желдак // System technologies. – N 4.(74), Dnipropetrovsk, 2011. — p. 77–84.
8. Желдак Т.А. Использование систем самонавигации для идентификации марки стали в кислородно-конвертерном производстве / Т.А. Желдак, Н.А. Кучеренко // Научный вестник НГУ – Д.: Национальный горный университет. – 2011. - №1. – с. 94-98.
9. Гаранжа Д.М. Факторный анализ влияния технологических параметров процесса горячей прокатки на длину раската и построение прогнозирующей модели / Гаранжа Д.М., Желдак Т.А., Краев М.В. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – №1 – С. 44–49.
10. Желдак Т.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером / Т.А. Желдак, Д.А. Воловенко // Научный вестник Национального горного университета. – 2011. - №5 – с. 133–136.
11. Желдак Т.А. Системный анализ факторов, которые определяют сортность проката и пути минимизации лишней продукции / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Научный вестник НГУ, №8. – Д.: Национальный горный университет, 2009. – с. 73-77.
12. Желдак Т.А. Оптимальное одномерное раскройное производство материала на прокатном производстве / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2009. — N 4. — С. 43-46.
13. Нестеров М.Е. Повышение эффективности устаревшего производства с помощью современных самообучающихся систем поддержки принятия решений на примере кислородно-конвертерного цеха ДМЗ им. Петровского / М.Е. Нестеров, Т.А. Желдак // Сборник научных работ НГУ – Д.: НГУ. – 2010. - №34, т. 2. – с. 202-207.
14. Слесарев В.В. Оптимизация раскройного производства продукции прокатного производства с использованием метода поиска с запретами / Слесарев В.В., Желдак Т.А., Гаранжа Д.М., Станіна О.Д. // Сборник научных работ НГУ. – 2010.

- № 35, т.2 – с. 41-50.

15. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних моделях складних об'єктів та систем / Т.А. Желдак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 3. — С. 95–106. **(CrossRef)**

16. Желдак Т.А. Застосування методу моделювання колонії мурах до розв'язання комбінаторних задач планування виконання замовлень металургійними підприємствами / Математичні машини і системи. – 2013. – № 4. – С. 95 – 106. **(CrossRef)**

Статті в міжнародних виданнях

17. Слесарев В.В. Математична модель матеріально-теплового балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / В.В. Слесарев, Т.А. Желдак // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. - №1 – с. 97–102. **(Scopus)**

18. Zheldak T. A. The algorithm of artificial immune system simulation with Saaty selection operator and one-dimensional local search / T. A. Zheldak, V. V. Slesarev, I. G. Gulina // Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk, 2016, 5: 149–156. **(Scopus)**

19. Hnatushenko, V. V. Mathematical Model Of Steel Consumption Minimization Considering The Two-Stage Billets Cutting / V. V. Hnatushenko, T. A. Zheldak, L. S. Koriashkina // Natsional'nyi Hirnychyi Universytet. Naukovyi Visnyk, 2021, 2: 118-124. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/118> **(Scopus)**

20. Avramenko S.E. Guided hybrid genetic algorithm for solving global optimization problems / S.E. Avramenko, T.A. Zheldak, L.S. Koriashkina // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021, 2.: 174-188. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-2-18> **(WoS)**

21. Slesaryev, V.V. Using of the Tabu search method in optimization the rolled stock layout / V.V. Slesaryev, T.A. Zheldak, D.M. Garanzha and O.D. Stanina // Scientific Reports on Resource Issues. Vol. 2, 2012: Rock Strength, Rock

Fragmentation and Effective Use of Energy Potential of Geotechnical Systems. – TU Bergacademie Freiberg. – p. 87-99. (**CrossRef**)

22. Zheldak, T.A. Knowledge-Based Intellectual DSS of Steel Deoxidation in BOF Production Process. / T.A. Zheldak, V.V. Slesarev, and D.O. Volovenko // American Journal of Mining and Metallurgy 1.1 (2013): 7-10. DOI:10.12691/ajmm-1-1-2 (**CrossRef**)

23. Zheldak, T.A., and Redko V.. "Using an Evolutionary Heuristics for Solving the Outdoor Advertising Optimization Problem." Journal of Computer Sciences and Applications 2.2 (2014): 23-30. DOI: 10.12691/jcsa-2-2-2 (**CrossRef**)

Публікації, які підтверджують апробацію результатів дослідження

24. Zheldak T. Efficiency Improvement of the Algorithm Based on an Artificial Immune System Modeling Applied to Continuous and Combinatorial Problems / Zheldak, T., Ziborov, I., Lyman, V., Zhuk, A. // CEUR Workshop Proceedings, 2021, 3106, pp. 82–95. (**Scopus**)

25. Желдак Т.А. Проблема оптимального одновимірного розкромлювання матеріалу у прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Автоматика – 2008: Тези доповідей XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23 – 26 вересня 2008 р. – Одеса: ОНМА. – с. 769 – 771.

26. Воловенко Д.О. Факторний аналіз процесу виготовлення товарної продукції в умовах прокатного цеху №1 ДМЗ ім. Петровського / Д.О. Воловенко, Т.А. Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 26-30 травня 2009 р. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2009. – с. 307.

27. Шев’яков В.О. Програмна підтримка прийняття рішень при виборі маршруту прокатки безшовних труб в умовах «НТЗ–Інтерпайп» / В.О. Шев’яков, Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 26-30 травня 2009 р. – К.: НТУУ “КПІ”, 2009. – с. 376.

28. Желдак Т.А. Система підтримки прийняття рішень планування

виробництва та контролю перебігу технологічного процесу [Текст] / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // 17-та Міжнапродна конференція з автоматичного управління “Автоматика-2010”. Тези доповідей. Т. 1. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – с. 212-214.

29. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних моделях складних об’єктів та систем / Т.А. Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали 13-ї міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2011, Київ, 23-28 травня 2011 р. – К.: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2011. – с. 244.

30. Желдак Т.А. Системный анализ процесса горячей прокатки бесшовных труб с оптимизацией системы обработки заказов / Т.А. Желдак // Тезисы докл. Междун. науч.-техн. конф. «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "ИНФОТЕХ-2011"». Севастополь, 5-10 сентября 2011 г. – Севастополь: СевНТУ. – 2011. – с. 133-134.

31. Воловенко Д.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером / Д.А. Воловенко, Т.А. Желдак // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Севастополь, 5-9 вересня 2011 р. – Севастополь: СевНТУ. – 2011. – с. 225-227.

32. Желдак Т.А. Про вдосконалення однієї еволюційної стратегії дійсночисельної оптимізації / Т.А. Желдак // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2011): тези доповідей ІХ міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2011 р. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2011. – с. 82-83.

33. Желдак Т.А. Автоматизована система регулювання висоти наливу злитків при сортопрокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2012): матеріали ІІІ Міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 14-16 березня 2012 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2012. – с. 107-109.

34. Гаранжа Д.М. Розв’язання задачі одновимірного розкроювання за допомогою метаевристичних алгоритмів // Д.М. Гаранжа, Т.А. Желдак //

Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2012): матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 14-16 березня 2012 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2012. – с. 63-65.

35. Желдак Т.А. Математична модель матеріально-теплового балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Інформаційні технології в освіті, науці й техніці (ІТОНТ-2012): матеріали міжнар. наук.-практ. конф.: Черкаси, 25-27 квітня 2012 р. – Черкаси: ЧДТУ. – 2012. – т.1. – с. 23-24.

36. Желдак Т.А. Застосування технології OLAP для ідентифікації параметрів складних технічних систем при багатоетапному виробництві / Т.А. Желдак // VI міжнародна школа-семінар - "Теорія прийняття рішень", Ужгород, 1-6 жовтня 2012 р. – Ужгород: "Інвізор", 2012 – 118с.

37. Желдак Т.А. Застосування методу оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій та його модифікацій / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2013): матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 13-16 березня 2013 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2013. – с. 105-107.

38. Желдак Т.А. Планування виконання замовлень металургійними підприємствами на основі розв'язків комбінаторних задач / Т.А. Желдак // Мат. IV Всеукр. наук.–практ. конф. "Інформатика та системні науки" ІСН – 2013. Полтава, 21–23 березня 2013 р. – Полтава: «Видавництво». – 2013. – с. 125 – 128.

39. Желдак Т.А. Метод моделювання штучної імунної системи в задачах оптимізації мультимодальних функцій / Т.А. Желдак // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): Матеріали 2-ї міжнар. наук.-техн. конф. 14-17 травня 2013 р. – Черкаси: Маклаут, 2013. – с. 33-36.

40. Желдак Т.А. Використання модифікованого методу моделювання штучних імунних систем для вирішення комбінаторних оптимізаційних задач / Т.А.Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали 15-ї міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2013, Київ, 27-31 травня 2013 р. – К.: ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ", 2013. – с. 271-272.

41. Желдак Т.А. Адаптація алгоритму моделювання штучної імунної системи з селективним оператором Сааті та обмеженим локальним пошуком / Т.А. Желдак // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2013): тези доповідей XI Міжнар. наук.-практ. конф., 20-22 листопада 2013 р. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2013. – с. 80-81.

42. Желдак Т.А. Використання технології OLAP для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Т.А. Желдак // Праці VII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2014. – с. 105-106.

43. Желдак Т.А. Експертна система статистичного контролю механічних властивостей прокатної продукції / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Праці VII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2014. – с. 107-108.

44. Антоненко Н.А. Використання штучної нейронної мережі для прогнозування стійкості футеровки конвертера [текст] / Н.А. Антоненко Н.А., Т.А. Желдак // Праці VIII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2016. – с. 30-31.

45. Зінченко О.В. Побудова регресійної моделі прогнозування стійкості футеровки конвертера з урахуванням мультиколінеарності [текст] / О.В. Зінченко, Т.А. Желдак // Праці VIII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2016. – с. 124-125.

46. Антоненко Н.А. Використання методу групового врахування аргументів для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Н.А. Антоненко, Т.А. Желдак // Матеріали міжнар. конф. «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)». – Київ, КНУ, 2017. – с. 193-194.

47. Зінченко О.В. Побудова регресійної моделі стійкості футеровки кисневого конвертера / О.В. Зінченко, Т.А. Желдак // Матеріали міжнар. конф. «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)». – Київ, КНУ, 2017. – с. 232-233.

48. Желдак Т.А. Статистичні підходи до прогнозування стійкості футеровки конвертера / Т.А. Желдак., Н.А. Антоненко // Інформаційні технології в

металургії та машинобудуванні. ITMM'2020: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. – Дніпро: НМетАУ, 2020. – с. 149-151.

49. Желдак Т.А. Оптимізація двоетапного виробництва металопрокату шляхом формування зливків / Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем. СМОCS-2020: тези доповідей 6-ї міжн. наук.-техн. конф. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ. 2020. – с. 80-81. doi:10.32434/СМОCS-2020

50. Желдак Т.А. Керування параметрами оптимізаційного алгоритму на основі моделювання штучної імунної системи / Т.А. Желдак, І.К. Зіборов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2021: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – с. 136-140. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.045>

51. Зіборов І.К. Адаптивний оператор стиснення популяції як запорука успішності еволюційних пошукових алгоритмів / І.К. Зіборов, Т.А. Желдак // «Наукова весна» 2022: мат. XII Всеукр. наук.-техн. конф., Дніпро, 23–24 травня 2022 року – Дніпро : НТУ «ДП», 2022 – с 161-162.

52. Желдак Т.А. Алгоритм роботи підсистеми розкроювання заготовок СППР керування багатоетапним прокатним виробництвом / Т.А. Желдак, І.К. Зіборов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2023: тези доповідей міжн. наук.-практ. конф. – Дніпро: УДУНТ, 2023. – с. 294 – 297. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.079

ДОДАТОК Б.**ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДОСЛІДЖЕНЬ**

«ЗАТВЕРДЖЕНО»

Проректор з науково-педагогічної
роботи Національного технічного
університету «Дніпровська політехніка»

[Signature]
Артем ПАВЛИЧЕНКО

« *[Signature]* » _____ 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук в навчальний процес Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

Цим актом затверджується факт того, що науково-прикладні результати дисертаційної роботи **Желдака Тімура Анатолійовича** на тему «Інтегрована система підтримки прийняття рішень при керуванні виробництвом прокату на основі дворівневих техніко-економічних моделей» упроваджено до навчального процесу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» в межах підготовки здобувачів :

- ступеню бакалавра галузі F «Інформаційні технології» - при викладенні дисциплін «Системи штучного інтелекту», розділи «Розробка інтелектуальних систем», «Обробка і використання знань» та дисципліни «Еволюційні методи прийняття рішень в умовах невизначеності», розділи: «Штучні імунні системи», «Гібридні алгоритми», «Адаптація еволюційних алгоритмів»,
- ступеню магістра спеціальності F4 Системний аналіз – при викладанні дисципліни «Інтелектуальний аналіз даних, розділи:» «Препроцесинг вхідної інформації», «Пошукові агенти та самонавчання», «Еволюційні технології пошуку рішень» та «Прогнозування характеристик складних процесів та систем».

На основі дисертаційних досліджень підготовлено лекційні матеріали та розроблені завдання до індивідуальних практичних завдань.

Декан факультету інформаційних
технологій, к.т.н., доцент

[Signature]

Ірина УДОВИК

Гарант ОПП F4 «Системний аналіз»
к.ф.-м.н., доцент

[Signature]

Світлана УС



АКТ

про впровадження результатів дослідження
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Желдака Тімура Анатолійовича

Даний акт складено у тому, що в ТОВ «ІНТЕРПАЙП УКРАЇНА» прийнято до впровадження методи та математичні моделі планування виконання замовлень, розподілу виплавленої сталі по зливках та розкроювання передільних заготовок, запропонований в дисертаційному дослідженні к.т.н., доц. Желдака Т.А. «Математичне моделювання та еволюційний метод супроводу процесів прийняття рішень в багатоетапному прокатному виробництві».

Запропонований метод побудови плану виконання металургійним підприємством замовлень широкого асортименту з урахуванням часу переналаштування обладнання відрізняється від раніше відомих тим, що передбачає одночасне зважене врахування критеріїв: максимізації частки замовлень, виконаних у відповідності до встановлених термінів, мінімізації обсягів незавершеного виробництва упродовж всього періоду планування, мінімізації часу неробочого стану обладнання та мінімізації кількості замовлень, які не прийняті до виконання. Застосування такої моделі дозволило для реальних потоків тижневих та місячних замовлень будувати в реальному масштабі часу плани, що за часом виконання фіксованого набору завдань кращі, ніж отримані за традиційною методикою.

Застосування розроблених математичних моделей розподілу виплавленої сталі по зливках та розкроювання передільних заготовок в складі системи підтримки прийняття рішень в двопередільному прокатному виробництві дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу за рахунок мінімізації немірної продукції та кількості обрізків.

Начальник УНДР

Швец О.В.

02.07.2024

LIMITED LIABILITY COMPANY "INTERPIPE UKRAINE"

1A, Pysarzhivskyi str., Dnipro, Ukraine, 49005. Tel: +38 (056) 74 74 066, Fax: +38 (056) 74 74 974, +38 (056) 74 74 919
www.interpipe.biz e-mail: info@ua.interpipe.biz

IBAN: UA35305749000002600930287405, Beneficiary's bank: JSC "BANK CREDIT DNEPR", Kyiv, Ukraine

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ЯЛАНТИС УКРАЇНА»

пр.Слобожанський, будинок 40а, приміщення 15, місто Дніпро, Дніпропетровська обл., 49083
тел.: +38 (067)-562-56-77, email: general@yalantis.ua
ЄДРПОУ: 45239712

13.11.2024

№ 19

АКТ

про впровадження результатів дослідження
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Желдака Тімура Анатолійовича

Даний акт складено у тому, що в ТОВАРИСТВІ З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ЯЛАНТИС УКРАЇНА» прийнято до впровадження гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем, запропонований в дисертаційному дослідженні к.т.н., доц. Желдака Т.А. «Математичні моделі планування та керування виробничими процесами багатоетапного металургійного виробництва на основі адаптивних методів самонавчання».

Запропонований гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем використовує оператор клональної селекції на основі методу парних порівнянь, адаптивний ймовірнісний кросингвер, адаптивні оператори мутації та стиснення популяції та обмежений локальний пошук. Автором також обґрунтовані методи адаптації згаданих операторів та обмеження на числові параметри адаптаційних складових. Запропонований метод оптимізації дозволяє вирішувати широке коло задач, які передбачають багатоальтернативність та багатокритеріальність рішень. зокрема, в діяльності ТОВАРИСТВА З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ЯЛАНТИС УКРАЇНА» було застосовано комбінаторну версію алгоритму методу, запропонованого Желдаком Т.А. для розв'язання задач підбору персоналу, формування пакетів проектів, формування розкладів. Водночас дійсночисельна версія алгоритму була використана в ряді проектів в якості методу навчання систем штучного інтелекту, зокрема, глибоких нейронних мереж.

Застосування запропонованого гібридного адаптивного методу оптимізації для отримання оптимальних розв'язків задач планування, призначення персоналу та формування пакетів проектів в складі корпоративних інформаційних систем підприємства дозволило скоротити час отримання та підвищити надійність та точність отриманих розв'язків.

Директор
ТОВ «Ялантіс Україна»



Денис РУДЕНКО

**ІНОЗЕМНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«САЙТКОР УКРАЇНА»**

49100, м.Дніпро, вул. Космічна,115; код ЄДРПОУ: 33275506; н/р: UA703052990000026004050001241, тел 790-31-10

АКТ

**про впровадження результатів дослідження
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Желдака Тімура Анатолійовича**

Даний акт складено у тому, що в Іноземному підприємстві "САЙТКОР УКРАЇНА" прийнято до впровадження методик та математичну модель планування виконання замовлень, запропоновані в дисертаційному дослідженні к.т.н., доц. Желдака Т.А. «Математичні моделі планування та керування виробничими процесами багатоетапного металургійного виробництва на основі адаптивних методів самонавчання».

Запропонований метод побудови плану виконання підприємством замовлень широкого асортименту з урахуванням часу перепризначення персоналу відрізняється від раніше відомих тим, що передбачає одночасне зважене врахування критеріїв: максимізації частки замовлень, виконаних у відповідності до встановлених термінів, мінімізації обсягів незавершених проектів упродовж всього періоду планування, мінімізації часу неробочого стану персоналу та мінімізації кількості замовлень, які не прийняті до виконання. Застосування запропонованої Желдаком Т.А. математичної моделі планування виконання замовлень дозволило для реальних потоків тижневих та місячних замовлень будувати в реальному масштабі часу робочі плани, що за часом виконання фіксованого набору завдань кращі, ніж отримані за традиційною методикою. Зокрема, застосування цієї моделі дозволило підвищити коефіцієнт зайнятості персоналу на проектах на 4,8%.

Директор



Дмитро ВАСИЛИНЕНКО



**АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОД ФЕРОСПЛАВІВ»**

вул. Електрометалургів, 310, м. Нікополь, Дніпропетровська область, Україна, 53200
тел.: (0566) 654-236, (0566) 696-123, (0566) 630-802(803)
e-mail: 01@nzf.com.ua, www.nzf.com.ua, код згідно з ЄДРПОУ 00186520

Від 29.09.25 № 45/1

На № _____ від _____

АКТ

про впровадження результатів дослідження
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Желдака Тімура Анатолійовича

Даний акт складено у тому, що в Акціонерному товаристві «Нікопольський завод феросплавів» прийнято до впровадження методу розподілу металу по зливках при двопередільному прокатному виробництві на основі математичної моделі оптимізації використання металу на виконання замовлень, запропоновану в дисертаційному дослідженні к.т.н., доц. Желдака Т.А. «Автоматизація процесу прийняття рішень при виробництві прокату на основі інтелектуальних дворівневих техніко-економічних моделей».

Запропонована математична модель задачі мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення певного замовлення, розмір якого не перевищує об'єм однієї плавки, відрізняється від раніше відомих тим, що спирається на наперед відомий оптимальний розмір передільної заготовки, виходячи з бажаного розкроювання по довжині готової продукції, допустимих для даної продукції видів (перетинів) передільної заготовки та обмежень на вагу одного зливка згори та знизу.

Застосування розробленої моделі в складі системи підтримки прийняття рішень в двопередільному прокатному виробництві дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу зменшити витратний коефіцієнт металу на 2,4-2,5% при обробці великих замовлень та на 3-4% при виконанні малих замовлень за рахунок мінімізації немірної продукції та кількості обрізків.

В.о. головного енергетика

Максим МАЛИШКО

026467



АКТ
про впровадження результатів дослідження
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Желдака Тімура Анатолійовича

Даний акт складено у тому, що в ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ» прийнято до впровадження методика прогнозування стійкості футеровки плавильного агрегату, запропоновану в дисертаційному дослідженні к.т.н., доц. Желдака Т.А. «Автоматизація процесу прийняття рішень при виробництві прокату на основі інтелектуальних дворівневих техніко-економічних моделей».

Запропонована методика прогнозування стійкості футеровки за технічними параметрами та статистичними показниками ведення плавки відрізняється від раніше відомих тим, що передбачає двоетапну класифікацію поточного процесу функціонування футеровки спочатку за категорійними параметрами, а потім за числовими. Запропонована методика дозволяє суттєво зменшити простір пошуку за рахунок формулювання для кластерів простих регресійних моделей з високою точністю прогнозування, а також надавати оператору плавильного агрегату поради щодо методів ведення плавки, які дозволяють збільшити її ресурс, в режимі реального часу.

В ході експериментальної перевірки визначено, що фактичне значення стійкості футеровки за умови використання рекомендаційної підсистеми перевищує апіорний прогноз, отриманий за статистичними даними для даної марки вогнетривів, пори року та прогнозованої інтенсивності експлуатації в середньому на 4,25%. Водночас з'ясовано, що коли футеровка вже відпрацювала половину свого терміну експлуатації, прогнозне значення її стійкості з урахуванням порад, відрізняється від фактичного не більше ніж на 5%, що дозволяє запланувати час зупинки плавильного агрегату на заміну футеровки ще на половині прогнозованого часу її експлуатації.

Заступник генерального директора
 з фінансів, економіки та інформаційних технологій

ДМИТРО НИКОЛАЄВ



АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОД ФЕРОСПЛАВІВ»

вул. Електрометалургів, 310, м. Нікополь, Дніпропетровська область, Україна, 53200
тел.: (0566) 654-236, (0566) 696-123, (0566) 630-802(803)
e-mail: 01@nzf.com.ua, www.nzf.com.ua, код згідно з ЄДРПОУ 00186520

Від 29.09.25 № 45/2

На № _____ від _____

АКТ

про впровадження результатів дослідження
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
Желдака Тімура Анатолійовича

Даний акт складено у тому, що в Акціонерному товаристві «Нікопольський завод феросплавів» прийнято до впровадження метод самонавчання рекомендаційної підсистеми оператора ливарного виробництва, запропонований в дисертаційному дослідженні к.т.н., доц. Желдака Т.А. «Автоматизація процесу прийняття рішень при виробництві прокату на основі інтелектуальних дворівневих техніко-економічних моделей».

Запропонований метод самонавчання рекомендаційної системи оператора ливарного виробництва, оснований на аналізі попередньої діяльності, відрізняється від раніше відомих тим, що використовує для прогнозування оптимальної кількості феросплавів у процесі розкислення сталі метод самонавчання на основі наївної мережі Байеса з корекцією на поведінку людини. Застосування удосконаленого методу самонавчання в процесі розкислення сталі дозволяє суттєво зменшити вплив «людського фактору» на ведення плавки та використання феросплавів.

В ході експериментальної перевірки застосування запропонованого методу самонавчання у контурі управління процесом розкислення доведено, що за умов наявності достатньої кількості попередніх плавок, що є аналогами поточного замовлення, він дозволяє зменшити собівартість використаних феросплавів на 2,5-3,8%.

В.о. головного енергетика

Максим МАЛИШКО

026465